

**ESPECIES ORNAMENTALES Y SILVICOLAS CON POTENCIAL  
BIODEPURANTE Y MITIGANTE DE LA CONTAMINACIÓN  
ATMOSFERICA Y DE OLORES OFENSIVOS, EMITIDOS POR LOS  
SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN PECUARIA**

**ELIZABETH CATHERINE LEÓN CASTRO**

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA “UNAD”  
ESCUELA DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE  
ECAPMA  
VILLAVICENCIO- META  
SEPTIEMBRE DE 2019**

## **RESUMEN**

En esta revisión documental se establecerán las causas de contaminación atmosférica producidas por las actividades agropecuarias y la fitorremediación como posible estrategia correctiva y/o mitigante.

Se expondrá el origen y las repercusiones ambientales que los gases emitidos por las explotaciones pecuarias pueden tener, así como los tipos de fitorremediación y las diferentes estrategias que pueden establecer las plantas para adaptarse al medio y reducir o convertir compuestos contaminantes en materia prima para su mantenimiento, por medio de sus procesos fisiológicos.

De igual manera se expondrán los diferentes procesos fotosintéticos que se deben tener en cuenta al escoger las especies de plantas con cualidades fitorremediadoras, las asociaciones de las plantas con microbiota para aprovechar material contaminante y finalmente se caracterizarán algunas especies ornamentales con cualidades biodepurantes del aire en espacios internos, especies silvícolas con acción mitigante de olores ofensivos y otras en las que por sus condiciones habituales de desarrollo están expuestas a contaminantes de origen volcánico, viéndose forzadas a adaptarse y aprovechar este tipo de compuestos; cualidades que las convierte en candidatas de estudio para ser utilizadas en fitorremediación atmosférica, en actividades agropecuarias donde se producen este tipo de contaminantes.

Esta monografía tiene por objetivo, identificar las causas y los impactos negativos producidos por los contaminantes atmosféricos que son emitidos por la actividad agropecuaria; entre estos algunos de gran importancia ambiental por ser gases efecto invernadero (GEI) o precursores de estos y también los denominados olores ofensivos, que pudieren causar problemáticas sociales de no ser manejados integralmente por los sistemas pecuarios; También los procesos fisiológicos que usan las plantas para la adopción de contaminantes por medio de sus estructuras o en simbiosis con microorganismos, así como la presentación de algunas especies con potencial biodepurante o mitigante de olores de las explotaciones pecuarias, de las cuales habría que hacer mayor investigación para establecer el grado de fitorremediación de gases y olores específicos.

## **ABSTRACT**

In this documentary review, the causes of air pollution caused by agricultural activities and phytoremediation will be established as a possible corrective and / or mitigating strategy.

The origin and environmental repercussions that the gases emitted by livestock farms may have, as well as the types of phytoremediation and the different strategies that plants can establish to adapt to the environment and reduce or convert polluting compounds into raw material for maintenance will be exposed , through its physiological processes.

Similarly, the different photosynthetic processes that should be taken into account when choosing plant species with phytoremediation qualities, associations of plants with microbiota to take advantage of contaminating material will be exposed and finally some ornamental species with biodepurating qualities of air in spaces will be characterized internal, silvicultural species with mitigating action of offensive odors and others in which due to their usual development conditions they are exposed to volcanic pollutants, being forced to adapt and take advantage of this type of compounds; qualities that make them study candidates to be used in atmospheric phytoremediation, in agricultural activities where this type of pollutants are produced.

This monograph aims to identify the causes and negative impacts produced by air pollutants that are emitted by agricultural activity; among these some of great environmental importance because they are greenhouse gases (GEI) or precursors of these and also the so-called offensive odors, which could cause social problems of not being managed integrally by livestock systems; Also the physiological processes that plants use for the adoption of pollutants through their structures or in symbiosis with microorganisms, as well as the presentation of some species with biodepurating or odor mitigating potential from livestock farms, of which we would have to do more research to establish the degree of phytoremediation of specific gases and odors.

## ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN .....	1
1. EMISION DE GASES POR LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN PECUARIA .....	7
1.1 Sulfuro de hidrogeno (H <sub>2</sub> S) .....	9
1.2 Amoniac NH <sub>3</sub> .....	10
1.3 Mercaptanos .....	13
1.4 Metano (CH <sub>4</sub> ).....	14
1.5 Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O) .....	15
2. FITORREMEDIACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.....	16
3. PROCESO DE ABSORCIÓN Y FIJACIÓN DE GASES A TRAVÉS DE LAS HOJAS - ESTOMAS .....	21
4. REDUCCIÓN DE COMPUESTOS CONTAMINANTES ATMOSFERICOS POR FITOREMEDIACIÓN .....	29
4.1 Fitorremediación del aire en espacios internos de COVs (Compuestos Orgánicos Volátiles) .....	30
4.2 Biodepuración del aire por medio de asociación de plantas y microbiota .....	33
4.3 Remediación de Material Particulado (PM) .....	39
4.4 Remediación de SO <sub>2</sub> .....	39
4.5 Remediación de NO <sub>x</sub> .....	40
4.6 Remediación de O <sub>3</sub> .....	41
5. ESPECIES ORNAMENTALES CON POTENCIAL BIODEPURANTE DEL AIRE.....	42
5.1 <i>Epipremnum aureum</i> .....	43
5.2 <i>Spathiphyllum sp.</i> .....	44
5.3 <i>Sansevieria trifasciata</i> .....	45
5.4 <i>Chamaedorea seifrizii</i> .....	46
5.5 <i>Dracaena deremensis</i> .....	47
6. ESPECIES SILVICOLAS CON POTENCIAL MITIGANTE DE OLORES OFENSIVOS .....	47
6.1 <i>Cananga odorata</i> .....	48
6.2 <i>Cestrum nocturnum</i> .....	49

**7. ESPECIES HABITUALMENTE EXPUESTAS A GASES VOLCANICOS CON  
POTENCIAL BIODEPURANTE DE COMPUESTOS AZUFRADOS .....49**

*7.1 Cibotium menziesii*..... 50

**DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....51**

**CONCLUSIÓN .....55**

**REFERENCIAS .....56**

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Número de quejas por olores ofensivos según sector .....	4
Figura 2. Ciclo del nitrógeno a través de diferentes fases y niveles tróficos .....	12
Figura 3. Morfología interna de la hoja.....	22
Figura 4. Disposición de las células epidérmicas y células oclusivas .....	25
Figura 5. Ilustración esquemática de la Filosfera.....	34

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características y concentraciones perceptibles de distintas sustancias en el aire por las explotaciones pecuarias.....14

Tabla 2. Procesos de Fitorremediación ambiental.....17

Tabla 3. Asociación de plantas y microorganismos capaces de biodegradar o biotransformar los contaminantes de aire.....35

## INTRODUCCIÓN

El continuo y acelerado crecimiento demográfico no solo en nuestro país si no a nivel global, presenta grandes desafíos a nivel de la producción de alimentos, ocasionando que el sector pecuario deba producir de una manera intensiva, concentrada geográficamente, integrada horizontal y verticalmente y vinculada con el sistema agroindustrial internacional, que evidentemente si no cuenta con sistemas de manejo integral ambiental, producirá mayores impactos negativos sobre el medio ambiente. (Ardila & Vergara, 2012)

De la intensificación de los sistemas de producción animal se derivan problemáticas ambientales que afectan los recursos naturales; la concentración de excretas en áreas reducidas son la principal fuente de exceso de nutrientes, patógenos, metales pesados, antibióticos y otras drogas veterinarias, impactando negativamente el aire, el suelo y el agua. (Herrero & Gil, 2008)

El estiércol generado en los sistemas ganaderos pueden provocar impactos ambientales negativos si no existe control en el almacenamiento, el transporte o la aplicación en el suelo, debido a la emisión de gases contaminantes hacia la atmosfera y la acumulación de macro y micro nutrientes en el suelo y en los cuerpos hídricos superficiales (Rodriguez Pinos, y otros, 2012); así mismo la inexistencia de alternativas que remedien o mitiguen estos efectos nocivos no solo para el medio ambiente, sino para garantizar el bienestar de las personas que trabajan en la explotación y el de los habitantes circundantes a las granjas, se convierte en temática de investigación.

Los contaminantes emitidos a la atmosfera provenientes del estiércol incluyen polvo, olores y gases producto de la digestión anaeróbica y descomposición aeróbica.

La contaminación atmosférica se define, como la presencia de sustancias en la atmosfera en altas concentraciones en un tiempo determinado, como resultado de actividades antropogénicas, que pudieren o no tener repercusiones en la salud humana, pero que pueden perturbar o producir fastidio a la comunidad como el caso de los olores ofensivos. (Min. Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010) (Herrera, Rojas, & Bolaños, 2013)

De manera general, los contaminantes generados en la atmosfera por los sistemas de explotación pecuaria son:



**Ácidos orgánicos volátiles:** estos compuestos son generados durante la hidrólisis de los ácidos grasos presentes en el estiércol, se destacan los ácidos acético, propiónico, butírico, valérico y caprónico, que se caracterizan por su volatilidad y olor penetrante. Por su carácter ácido, en condiciones ambientales adversas (pobre ventilación versus exposición prolongada), causan irritaciones en las mucosas del sistema respiratorio de los animales y seres humanos.

**Amoníaco:** Se forma por la descomposición de la urea presente en las excretas. El amoníaco es un gas alcalino irritante y de olor penetrante, que cuando se concentra en un espacio cerrado no solo causa irritación del sistema respiratorio sino que también afecta los ojos. (Min. Medio Ambiente y Desarrollo sostenible & FENAVI, 2014)

El amoníaco es tóxico para la actividad humana ( $>15\text{ppm}$ ), contribuye significativamente en la eutrofización del agua, la acidificación del suelo y agua, así como la aplicación descontrolada de fertilizante orgánico a suelos pobres en materia orgánica, provoca un excesivo enriquecimiento en nitrógeno (N) actuando como reservorio y precursor potencial en la emisión de óxido nítrico, el cual junto con el metano ( $\text{CH}_4$ ) hacen parte del conjunto de gases efecto invernadero (GEI) que contribuyen con el calentamiento global gracias a su potente capacidad radiativa y de absorción de energía infrarroja. (Morazán Nuñez, 2014)

Las excretas animales contribuyen con cerca del 50% del total de emisiones de amoníaco hacia la atmósfera, porque su tasa de volatilización es mayor a 23%. (Rodríguez Pinos, y otros, 2012)

**Metano:** Es un gas combustible producido en condiciones anaerobias, el metano ( $\text{CH}_4$ ), tiene la capacidad de absorber radiación infrarroja propiciando el calentamiento gradual de la atmósfera, lo que se conoce como efecto invernadero. El potencial de calentamiento global (GWP) es una medida relativa del efecto radiativo de los gases efecto invernadero comparado con el del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); para el gas metano el GWP es de 21 en esta escala. (Presidencia de la República Dominicana & Consejo Nal. para el cambio climático, 2013)

**Dióxido de carbono:** Es producto tanto de la descomposición aeróbica como anaeróbica de los estiércoles. Es un gas inerte y tiene efectos tóxicos en elevadas concentraciones; es el principal agente causante del efecto invernadero por su capacidad de absorber radiación infrarroja y por ser una de las mayores emisiones atmosféricas antropogénicas, debido a que también se genera como resultado del uso de combustibles fósiles.

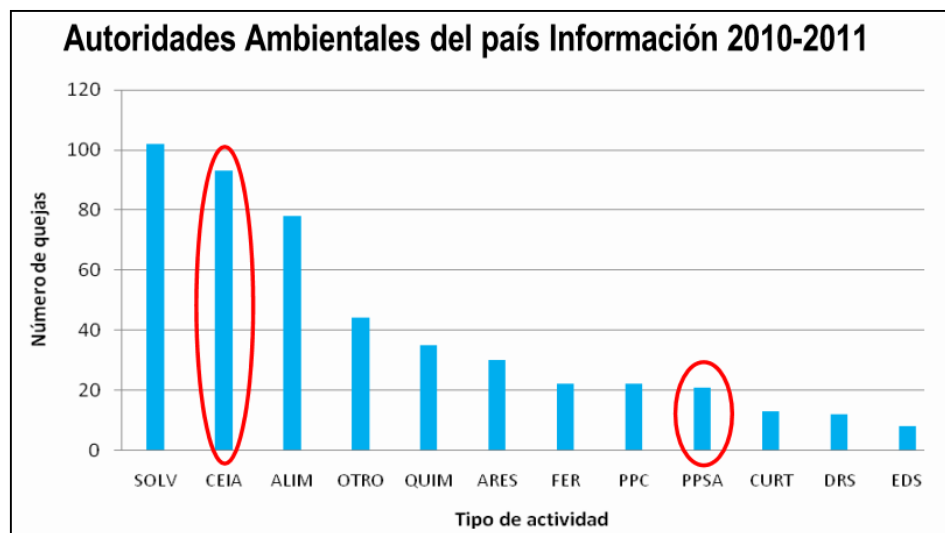
**Gas sulfhídrico:** el  $H_2S$  se produce por la degradación biológica en condiciones anaeróbicas de los compuestos azufrados. El gas sulfhídrico o sulfuro de hidrogeno tiene el olor característico a huevo podrido, perceptible en concentraciones muy bajas (2ppm). Es el principal agente aromático de las emisiones provenientes de la descomposición del estiércol y es un gas altamente corrosivo, que afecta principalmente los metales ferrosos.

**Partículas respirables o material particulado:** La caspa que emiten los animales y el polvo proveniente de las camas y del alimento concentrado, se suspenden fácilmente en el aire dentro de los galpones, pjaras, establos etc, donde los trabajadores se exponen al inhalar estas partículas que con el tiempo, pueden causar una infección crónica denominada asma ocupacional, principalmente en instalaciones mal diseñadas o en explotaciones con densidades inadecuadas. (Min. Medio Ambiente y Desarrollo sostenible & FENAVI, 2014)

Los malos olores se pueden entender como la sensación resultante de la interacción de especies químicas volátiles inhalados a través de la nariz, incluyendo compuestos de azufre (sulfuros y mercaptanos), compuestos nitrogenados (amoniac y aminos) y compuestos orgánicos volátiles (esteres, ácidos, aldehídos, cetonas, alcoholes) (Ramos Rincon, Bermudez, & Rojas, 2017)

Según el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible en la reglamentación de olores ofensivos, el número de quejas vinculadas al tipo de actividad económica, la Cría y Explotación Industrial de Animales (CEIA) se encuentra dentro de las actividades que produce mayor generación de quejas e inconformidades asociados a la emisión de olores ofensivos.

**Figura 1. Número de quejas por olores ofensivos según sector**



Fuente: Recuperado de Reglamentación de olores ofensivos- MADS

Figura 1. Recubrimiento de superficies (SOLV), Cría y explotación industrial de animales (CEIA), Industria de fabricación de alimentos (ALIM), Industria química (QUIM), Aguas residuales (ARES), Fertilizantes (FERT), Plantas de procesamiento de carnes (PPC), Plantas de procesamiento de subproductos animales (PPSA), Curtiembres (CURT), Disposición de residuos Sólidos (DRS), Estaciones de Servicios de Combustible (EDC).

Las principales sustancias generadoras de olores ofensivos son: acetaldehído ( $C_2H_4O$ ), Acido butírico ( $C_4H_8O_2$ ), amoniaco ( $NH_3$ ), Clorofenol ( $C_6H_5ClO$ ), Dicloruro de azufre ( $SCl_2$ ), Etil mercaptano ( $C_2H_5SH$ ), Etil acrilato ( $C_5H_8O_2$ ), Estireno ( $C_8H_8$ ), Monometil amina ( $CH_5N$ ), Metil mercaptano ( $CH_3SH$ ), Nitrobenceno ( $C_6H_5NO_2$ ), Propil mercaptano ( $C_3H_8S$ ), Butil mercaptano ( $C_4H_{10}S$ ), Sulfuro de dimetilo ( $C_2H_5S$ ), sulfuro de hidrogeno ( $H_2S$ ). (Min. Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010)

Estas moléculas odoríferas tienen como propiedad que son altamente volátiles por su composición ya que tienen grupos reductores y una elevada polarizabilidad; aunque dentro de estos compuestos se encuentran el azufre, oxígeno y el nitrógeno que se generan en las explotaciones agropecuarias, ha sido demostrado que la mayoría de olores están asociados con los compuestos de azufre volátiles (VSC), especialmente el metanotiol (MT), el sulfuro

de dimetilo (DMS) y el disulfuro de dimetilo (DMDS). (Ramos Rincon, Bermudez, & Rojas, 2017).

Cuando se habla de olores ofensivos se tienen dos condiciones a) la presencia de una o mas actividades generadoras de olores y b) un receptor sensible, siendo este ultimo quien actua como indicador de la presencia de olores ofensivos en el ambiente, la materializacion de dicha situacion se tiene cuando un receptor involucra a las Autoridades ambientales a traves de una queja. (Min. de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014)

La molestia por el olor se manifiesta en los lugares de impacto y no se puede medir con equipo olfatométrico, ni con la determinación del umbral del olor. Debido a los efectos del olor, las reacciones de molestia se pueden originar debido a la Localización, Intensidad y el tipo de Olor, así como por la Duración y la Frecuencia de su presencia (FIDOL). (INCONTEC, 2013)

Si bien no se ha demostrado que los olores ofensivos causan la muerte, si producen graves manifestaciones en las personas que se encuentran cercanas al desarrollo de las explotaciones pecuarias propiciando en ellas insomnio, mal humor, dolor de cabeza, irritación en mucosa, tendencia a desarrollar situaciones de estrés, náuseas, vómitos, reacciones aparentemente neurotóxicas, tales como comportamiento evasivo, pérdidas de memoria, problemas de concentración, interacción con otros sistemas sensoriales o biológicos que provocan hipersensibilidad, cambios en las pautas de respiración y en algunas ocasiones pérdida del sentido del olfato. (Ramos Rincon, Bermudez, & Rojas, 2017)

Los olores emitidos por las explotaciones pecuarias provienen de tres actividades principalmente, 1) Las instalaciones de producción y animales que se encuentran en confinamiento, 2) las instalaciones de almacenamiento de estiércol y 3) la aplicación de esa materia orgánica a en los suelos.

Es decir que para mitigar los impactos producidos por estas emisiones, se deben adoptar medidas eficientes en el manejo de las excretas y además proveer a los productores de herramientas biotecnológicas, que vayan de la mano con la sostenibilidad ambiental, social y económica de la empresa; la reforestación alrededor de la granja y de las instalaciones por ejemplo, se ha identificado como una medida efectiva de bajo costo, que

mejora la captación de amoníaco a nivel de la explotación y reduce el transporte atmosférico lejano. (Tabler, 2006)

Considerando que la emisión de olores ofensivos se constituye como una problemática social y ambiental al ser algunos de estos compuestos precursores de gases efecto invernadero (GEI), se hace imperativa la búsqueda y empleo de alternativas en gestión ambiental que mitiguen, controlen y/o corrijan los efectos e impactos negativos causados por los sistemas pecuarios convencionales convirtiéndolos en agro ecosistemas sostenibles y sustentables en el tiempo.

La Fitoremediación es un conjunto de tecnologías en las que se aprovecha la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua, tales como: metales pesados, metales radioactivos, compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo, por medio de los mecanismos fisiológicos básicos como la transpiración, fotosíntesis, metabolismo y nutrición. (Delgadillo Lopez, Gonzalez Ramirez, Prieto Garcia , Villagomez Ibarra, & Acevedo Sandoval, 2011)

En la década de los ochenta la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio, más conocida como NASA, se convirtió en líder en la búsqueda e identificación de soluciones biológicas a los problemas asociados a la contaminación del aire en espacios interiores, poniendo a prueba la eficacia de la biodepuración del aire utilizando plantas que actuaban sobre contaminantes tales como formaldehído, xileno, amoníaco, benceno - Componentes Orgánicos Volátiles (VOC), demostrando que los espacios sometidos a la emisión de estos compuestos junto con la acción de 15 especies diferentes de plantas, había favorecido la eliminación de los mismos. (Pedraza Ortiz, 2015)

Según estudios adelantados por la facultad de Ciencias Farmacéuticas y Biológicas de Lille (Francia) y el Departamento de Climatología, Aerodinámica, Polución y Depuración de Nantes (Francia), una sustancia contaminante presente en la atmósfera puede ser capturada por dos posibles vías: la primera es la raíz, una vez que el contaminante se ha disuelto en agua presente en el suelo; por esta vía ocurre una gran variedad de reacciones físicas, químicas y biológicas gracias a la participación de microorganismos. La segunda vía

de entrada son las hojas por absorción, a este nivel existen dos vías posibles a) a través de los estomas o b) a través de un depósito superficial. (Pedraza Ortiz, 2015)

El conocimiento acerca de plantas descontaminantes es un tema poco divulgado en el país y la inexistencia de estrategias ambientales que mitiguen y controlen los olores ofensivos producidos por las explotaciones pecuarias, justifican la investigación y la innovación en este campo del saber inexplorado aún.

Este trabajo de investigación tiene por objetivo, identificar los impactos negativos producidos por los contaminantes atmosféricos que son emitidos por la actividad agropecuaria; entre estos algunos de gran importancia ambiental por ser gases efecto invernadero (GEI) o precursores de estos y también los denominados olores ofensivos, que pudieran causar problemáticas sociales de no ser manejados integralmente por los sistemas pecuarios.

De igual manera se busca establecer, como por medio de los procesos fisiológicos comunes o en simbiosis con microorganismos, las plantas pueden tomar del medio (suelo, agua o aire) compuestos que pudieran ser tóxicos o contaminantes para los ecosistemas, convirtiéndose en factores de biodepuración de ambientes y en alternativas con potencial de uso en gestión ambiental, como por ejemplo los Planes de Reducción del Impacto por Olores ofensivos (PRIO) en los sistemas de producción animal.

## **1. EMISION DE GASES POR LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN PECUARIA**

Los procesos de fermentación que se producen en diferentes tramos del tracto digestivo de los animales susceptibles de explotación pecuaria (retículo-rumen y el tracto ceco-colónico) y posteriormente en sus excretas y residuos orgánicos (heces, orina, agua y residuos de alimentos) se transforman en emisiones de gases que adquieren importancia según la especie y el tipo de manejo que se les dé.

Estos gases se pueden clasificar en tres grupos 1) los molestos o nocivos para el desarrollo humano ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , mercaptanos) 2) los que tienen efecto invernadero ( $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$ ) y 3) los que incluirán ambos componentes ( $\text{NH}_3$ ). (Morazán Nuñez, 2014)

El sector agropecuario es la cuarta causa de emisiones de gases efecto invernadero (GEI), produciendo entre otros gases  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$ , con un poder de calentamiento de 28 y 298 veces más, respectivamente en comparación con el poder radiativo de una molécula de  $\text{CO}_2$ . (Saynes, Etchevers, Paz, & Alvarado, 2016)

Los gases de efecto invernadero (principalmente  $\text{CO}_2$ , el vapor de agua, el metano y el  $\text{N}_2\text{O}$ ) absorben parte de la energía que se irradia desde la superficie de la tierra y la atrapan en la atmosfera, actuando como si fuera una manta que permite mantener la temperatura en la tierra, sin embargo cuando los gases de efecto invernadero se acumulan en exceso se produce un calentamiento excesivo en el planeta.

La NASA ha calculado que en los últimos 100 años la temperatura media de la tierra ha aumentado entre 0,6 y 0,8 °C, asociado con un nivel en la concentración de gases efecto invernadero; los modelos de predicción indican que de seguir el proceso de acumulación de gases de efecto invernadero en la atmosfera terrestre, la temperatura de la superficie terrestre aumentara de 1 a 6°C a finales del siglo XXI.

El aporte de las actividades agro ganaderas en la acumulación de gases efecto invernadero en la atmosfera global se encuentra entre el 8 – 12 %, de estas aproximadamente un 5.1% son atribuibles a la ganadería y sus deyecciones. (Calsamiglia, 2012)

El olor en las deyecciones ganaderas se debe fundamentalmente al amoniaco, gas detectable en las concentraciones de entre 15 y 25 ppm, no obstante cuando las deyecciones sufren descomposiciones en ausencias de oxigeno comienza la liberación de compuestos como sulfuro de hidrogeno, escatoles, índoles, aminas, mercaptanos y otros gases sulfurosos, detectables a concentraciones muchísimo menores.

El amoniaco, el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno son los principales gases cuyo deposito da lugar a la acidificación de los suelos y aguas superficiales, no obstante mientras los últimos gases tienen principalmente su origen en la industria y el transporte, el amoniaco procede fundamentalmente de las fuentes agrarias, muy especialmente de la ganadería (Canet, Ribo, Pomares, & Albiach, 2006)

### **1.1 Sulfuro de hidrogeno ( $H_2S$ )**

El sulfuro de hidrogeno es un gas incoloro y toxico con un fuerte olor fétido a huevos podridos. Es uno de los compuestos resultantes de la reducción anaeróbica de determinados aminoácidos azufrados (metionina y cistina); se le conoce también bajo los nombres de ácido sulfhídrico y ácido hidrosulfúrico. (Herrera, Rojas, & Bolaños , 2013)

Generalmente su puede detectar el olor a bajas concentraciones en el aire, entre 0,0005 y 0,3 ppm (es decir 0,0005 a 0,3 partes de  $H_2S$  por un millón de partes de aire), sin embargo en altas concentraciones se puede perder la capacidad para detectar su olor, lo que lo convierte en un gas altamente peligroso.

Los efectos del sulfuro de hidrogeno, para la salud tanto de seres humanos como la de animales son muy graves, ya que este gas afecta directamente el sistema nervioso y puede producir parálisis respiratoria en concentraciones ligeramente elevadas, se puede acumular fácilmente en zonas bajas con poca ventilación gracias a que su peso es superior al del aire, por lo que existe riesgo de intoxicación mortal en las instalaciones pecuarias.

Cuando se libera, permanece en la atmosfera durante un promedio de 18 horas, lo que puede generar molestias en las poblaciones aledañas.

La exposición a concentraciones bajas de sulfuro de hidrogeno puede causar irritación de los ojos, la nariz o la garganta; también puede causar dificultad para respirar en personas asmáticas.

Las exposiciones breves a concentraciones altas a este gas (más de 500ppm) pueden producir perdida del conocimiento; en la mayoría de los casos, los individuos recuperan el conocimiento sin sufrir otros efectos, sin embargo los sujetos expuestos de manera recurrente pueden presentar efectos permanentes como por ejemplo dolor de cabeza, lapsos de concentración, mala memoria y alteración de las funciones motoras. (Division of Toxicology and Human Health Sciences, 2014)

Puede afectar desde concentraciones bajas (<1 ppm), dependiendo el tiempo de exposición, causa cambios de comportamiento y fisiológicos (cambios en la frecuencia de alimentación, incremento del ritmo cardiaco y de la frecuencia respiratoria) a partir de 50 ppm causa nauseas, vómitos y afectación del sistema nervioso con pérdida de la conciencia,



termina siendo letal a partir de 800ppm, debido al edema pulmonar que ocasiona. (Herrera, Rojas, & Bolaños , 2013)

La recomendación de sus niveles máximos para los animales y para el personal es de 5ppm; la formación de gas y su volatilización está influenciada por muchos factores: animales con diferentes características (genética, dieta, número de individuos, peso del animal, actividad y comportamiento); los desechos de animales (métodos de almacenamiento, tratamiento, pH, temperatura, área superficial ocupada), y también la ventilación.

Las bacterias productoras de sulfuro de hidrogeno comprenden diversos grupos de bacterias y arqueas, que obtienen energía reduciendo diversos compuestos que poseen azufre en su molécula, incluyendo compuestos orgánicos (aminoácidos azufrados) y compuestos inorgánicos con azufre oxidado (sulfatos, sulfitos, tiosulfatos, tetranionatos o azufre elemental).

Dentro de este heterogéneo grupo de bacterias se destacan las bacterias reductoras de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) las principales responsables de la formación de  $\text{H}_2\text{S}$  en anaerobiosis, las bacterias reductoras de azufre ( $\text{S}^0$ ), las bacterias sulfito reductoras ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) y bacterias tiosulfato reductoras ( $\text{SO}_2\text{S}_2^{2-}$ ).

## **1.2 Amoniaco $\text{NH}_3$**

Es un compuesto nitrogenado que proviene principalmente de la descomposición de excretas sólidas y líquidas; es de considerable olor picante y cuyo umbral de percepción para el olfato humano va de 5 a 15  $\text{mg/kg}^{-1}$ . (Velasco, y otros, 2016)

El amoniaco es un gas irritante, incoloro más ligero que el aire, muy soluble en agua, sus disoluciones son alcalinas y tienen un efecto corrosivo frente a metales y tejidos por lo que puede ser agresivo frente a las mucosas celulares y cuyos niveles no pueden exceder en las explotaciones pecuarias las 50 ppm; la concentración habitual en explotaciones oscila entre 5 y 20 ppm, concentraciones mayores producen irritación nasal y ocular, a partir de 50ppm producen cefaleas pudiendo ser letal a partir de los 5000ppm.

Se ha descrito que a partir de 30 ppm se ha disminuido la ingesta de alimento y por consiguiente la productividad, de la misma forma en condiciones experimentales su

exposición ha facilitado las infecciones por virus y micoplasmas. (Herrera, Rojas, & Bolaños , 2013)

El amoniaco que proviene de las excretas, se constituye principalmente en ácido úrico y en la mayoría de las condiciones se transforma rápidamente en urea; luego ocurre la hidrólisis de la urea por la acción de la ureasa liberada por ciertos grupos de bacterias eliminadas en las heces como se observa en las siguientes ecuaciones.



Los principales factores involucrados en el equilibrio químico de la última ecuación son: la temperatura de la excreta , la temperatura ambiente, la ventilación, el pH de la excreta , su contenido de amonio, el grosor de la capa de excretas y la superficie de contacto excreta-aire.

La volatilización del amoniaco de cualquier operación de AFO (por sus siglas en inglés: *Animal Fedding Operations*) varia significativamente dependiendo de la concentración de este gas, de la temperatura, del pH y del tiempo de almacenaje total. Las emisiones dependerán de la cantidad de amoniaco- nitrógeno disponible en disolución para poder reaccionar y producir amoniaco o bien generar amonio ionizado ( $NH_4^+$ ).

En la disolución el equilibrio entre  $NH_4^+$  y  $NH_3$  se controla por el pH y la temperatura.

Bajo condiciones acidas el amonio es la especie predominante y la volatilización del amoniaco ocurre a una tasa más baja con respecto a valores de pH más altos; sin embargo una cierta volatilización del amoniaco ocurre incluso bajo condiciones moderadamente acidas.

Conforme el pH aumenta por encima de 7, la concentración de amoniaco aumenta al igual que su índice de volatilización. (Herrera, Rojas, & Bolaños , 2013)

Su vida media en la atmosfera oscila entre tres y seis días y no se traslada más allá de unos cientos de kilómetros desde su lugar de emisión, por lo que se considera un contaminante a escala regional. Buena parte se deposita cerca del foco de emisión en forma particulada, mientras que el resto puede reaccionar con la atmosfera formando compuestos y

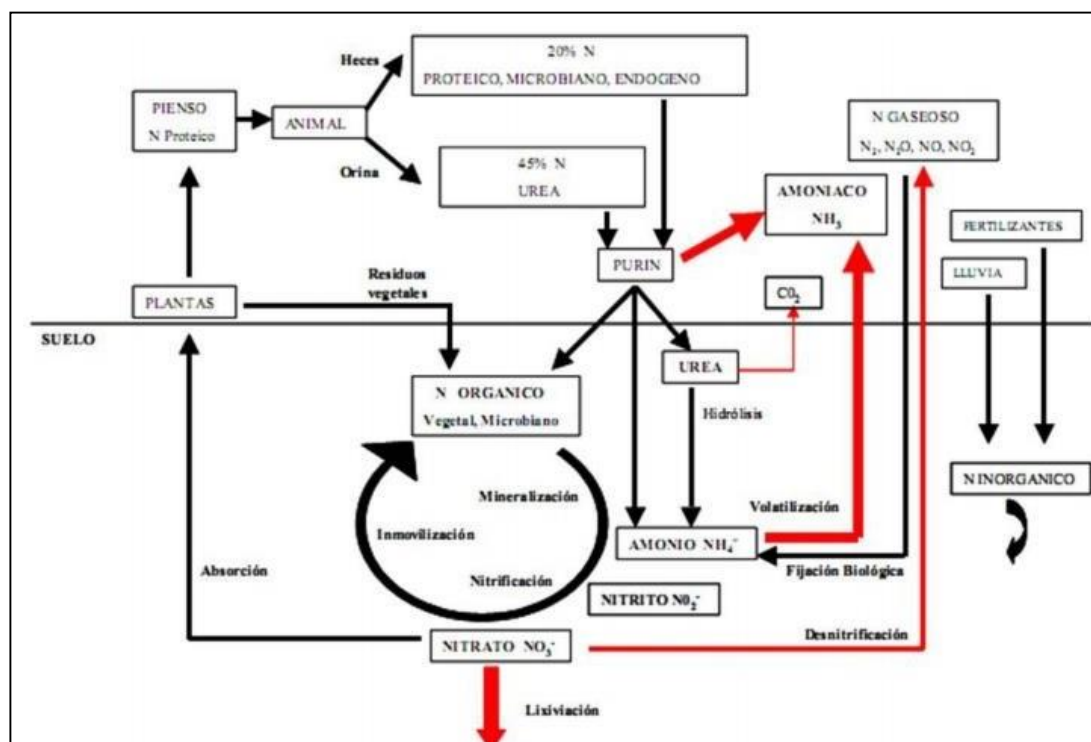
aerosoles amoniacales que pueden ser trasladados a distancias superiores y finalmente depositados sobre el terreno o el agua por las precipitaciones. (Canet, Ribo, Pomares, & Albiach, 2006)

El amoniaco transportado por vía aérea puede afectar ecosistemas cercanos y distantes en función de la sensibilidad ecológica del lugar de translocación o fuentes de agua en que se deposita ya sea en forma seca o húmeda, alterando la cadena trófica y provocando desordenes a la biodiversidad del área de depósito, por ejemplo el desplazamiento de especies endémicas del nicho por parte de especies oportunistas. (Velasco, y otros, 2016)

Este compuesto presenta una importante relación con los GEI, concretamente con la emisión de  $N_2O$ , la cual podemos situarla a dos niveles en la transformación que se produce  $NH_3 \leftrightarrow N_2O$ , principalmente en la troposfera por la presencia de emisiones no ionizantes ( $NH_3 + O \rightarrow NH_2 + OH$ ;  $NH_3 + OH \rightarrow NH_2 + H_2O$ ;  $NH_2 + NO_2 \rightarrow N_2O + H_2O$ ;  $2NH_3 + 2O_2 \rightarrow N_2O + 3H_2O$ ;  $NH_2 + HO_2 \rightarrow NH_3 + O_2$ ;  $NH_3 + O_2 \rightarrow NO + H_2O$ ;  $NH_3 + NO_2 \rightarrow N_2O + H_2O$  y por ser uno de los precursores necesarios y cuyas concentraciones en el purín están directamente relacionadas con los niveles de emisión y /o síntesis de  $N_2O$ . (Morazán Nuñez, 2014)

El flujo del N se desarrolla en tres fases fundamentales: el suelo, la biomasa y la atmosfera.

## **Figura 2. Ciclo del nitrógeno a través de diferentes fases y niveles tróficos**



Fuente: (Morazán Nuñez, 2014)

Así mismo, el amoniaco contenido en las excretas que son utilizadas indiscriminadamente para la fertilización en los suelos, ocasiona en un principio la elevación del pH ocasionando la muerte de las raíces de plantas de poca edad, las lombrices y demás organismos vivos existentes en el suelo, cuando el amoniaco se combina con el agua se forma hidróxido de amonio, que posteriormente se disocia en  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{OH}^-$ .

Luego, el  $\text{NH}_4^+$  queda absorbido por los coloides del suelo o continúa su proceso de nitrificación, mientras el  $\text{OH}^-$  eliminado por lixiviación, produce acidificación de los suelos y aguas subterráneas y superficiales por escorrentía. (Ruda, Mongiello, & Acosta, 2004)

### 1.3 Mercaptanos

También conocidos como tioles, son compuestos que contienen el grupo funcional formado por un átomo de azufre y un átomo de hidrogeno (-SH). Siendo el azufre análogo de un grupo hidroxilo (-OH), este grupo funcional es llamado grupo tiol o grupo sulhidrilo.

**Tabla 1. Características y concentraciones perceptibles de distintas sustancias en el aire por las explotaciones pecuarias**

Sustancia	Características del olor	Concentración que produce un olor perceptible (10-9g/l)
Acetaldehído	Acre	4
Amoniaco	Acre, penetrante	37
n-butil mercaptán	Repugnante	1.4
Etil mercaptán	Col podrida	0.19
Metil mercaptán	Col o cebolla podrida	1.1
Propil mercaptán	Repugnante	0.075
Ácido sulfhídrico	Huevos podridos	1.1
Disulfuro de carbono	Ligeramente acre	2.6

Fuente: (Mazzucchelli & Sánchez , 2018)

#### 1.4 Metano (CH<sub>4</sub>)

Es un gas efecto invernadero con potencial de calentamiento de la tierra de 23 sobre la base de un horizonte temporal de 100 años (IPCC, 2001). Las emisiones de CH<sub>4</sub> provenientes de la fermentación entérica, representan 9,4% del total procedente de las actividades antropogénicas. (Velasco, y otros, 2016)

El gas metano es un gas con baja solubilidad en agua, muy volátil. En los fermentadores pre-gástricos este gas se libera por eructación, mientras que en los fermentadores post gástricos se libera por flatulencias. Su producción depende principalmente del consumo de fibra, aunque en los fermentadores postgástricos se ha relacionado también con la ingestión de energía total.

Este proceso de fermentación puede continuar en las deyecciones y la intensidad de la emisión dependerá del mantenimiento de las condiciones de fermentación, de los niveles de anaerobiosis y por esta razón existirá una relación directa entre el tipo de manejo y los niveles de emisión, así como los tiempos de almacenamiento y la frecuencia de recogida en el interior de los alojamientos; la emisión de CH<sub>4</sub> no se restringe a la fase de almacenamiento de las deyecciones pues tiene su continuidad durante la aplicación de los purines a los cultivos. (Morazán Nuñez, 2014)

Los rumiantes son los más grandes contribuyentes al calentamiento global y continuo deterioro de la capa de ozono por la liberación de altas cantidades de este gas.

El metano se genera por los procesos fermentativos entéricos; el principal factor a nivel del rumen en la producción de este gas son las bacterias metanogénicas, quienes utilizan diferentes sustratos para la producción de metano, entre los cuales se encuentra el  $H_2$  y el  $CO_2$ . (Carmona, Bolivar, & Giraldo, 2005)

Durante el proceso de degradación del alimento, tanto en el rumen como en el intestino grueso, se forman ácidos grasos volátiles (acético, propionico, y butírico)  $H_2$ ,  $CO_2$ , amonio y calor.

La síntesis de  $CH_4$  será más alta cuando las condiciones en el rumen favorezcan la producción de acético sobre la de propionico, asociable a un excedente de  $H_2$ , expulsado por eructación. (Faverin, Gratton, & Machado, 2014)

Existen dos aspectos relacionados con la producción de metano. La cantidad de carbohidratos (CHOS) fermentados en el rumen y la producción de ácidos grasos producidos. Dentro de los factores relacionados con los aspectos mencionados se encuentran: el nivel de consumo, tipos de carbohidratos, procesamiento de forrajes, adición de lípidos y suministro de ionoforos, de igual manera la producción de metano tendrá variaciones, según la clase de ganado y el número de cabezas. (Nuñez, y otros, 2015)

### **1.5 Óxido nitroso ( $N_2O$ )**

Este gas es producido por procesos biológicos que ocurren en suelo y agua como resultado de una etapa del proceso de nitrificación y desnitrificación en condiciones de poca disponibilidad del oxígeno y 300 veces más potente que el  $CO_2$ , para atrapar calor en la atmosfera.

A través de la descomposición de las excretas de animales en los pisos de la cama de las explotaciones se genera gran cantidad de  $N_2O$ . (Velasco, y otros, 2016)

Para el caso de los suelos cultivados, las emisiones de  $N_2O$  están relacionadas con el uso inapropiado de fertilizantes nitrogenados, en los últimos 60 años la producción antrópica de nitrógeno para el uso de fertilizantes ha duplicado las tasas de fijación, modificando el ciclo del nitrógeno debido a las grandes cantidades de este elemento en su forma reactiva, incrementando el potencial de pérdida por procesos de transporte hidrológico en forma de amoníaco ( $NH_3$ ), amonio ( $NH_4$ ) y nitrato ( $NO_3$ ) o siendo volatilizado a la

atmosfera en forma de óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub> , óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y amoníaco (NH<sub>3</sub>),. (Saynes, Etchevers, Paz, & Alvarado, 2016)

Por su parte las excretas animales contribuyen con cerca del 25% de las emisiones antrópicas de óxido nitroso, el cual se genera durante los procesos de nitrificación (Oxidación biológica de amonio a nitrito y nitrato) y desnitrificación (reducción de nitrato a nitrógeno gaseoso) donde el intermediario es el óxido nitroso. (Rodríguez Pinos, y otros, 2012)

Por otro lado, la concentración atmosférica actual de N<sub>2</sub>O es 19% mayor en comparación con su concentración previa a la revolución industrial y tiene un tiempo de residencia en la atmosfera de 120 años, globalmente las actividades agrícolas son la fuente más importante de N<sub>2</sub>O emitido por los suelos, y aunque representan únicamente el 8% de las emisiones totales de GEI generan aproximadamente la mitad de emisiones del sector agrícola. Estas emisiones provienen de los suelos cultivados, de las excretas de los animales y de la quema de biomasa. (Saynes, Etchevers, Paz, & Alvarado, 2016)

## **2. FITORREMEDIACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL**

La fitorremediación puede ser definida como el conjunto de tecnologías por medio de las cuales se utilizan varias plantas que tengan la capacidad fisiológica y bioquímica para asimilar , metabolizar, detoxificar o inmovilizar metales pesados, compuestos orgánicos, radiactivos y petroderivados, contaminantes del suelo, el agua o el aire, para transformarlos en formas menos nocivas. (Bernal , 2014)

Esta herramienta biotecnológica reduce *in situ* o *ex situ* la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas removiendo, reduciendo, transformando, mineralizando, degradando, volatilizado o estabilizando contaminantes. (Delgadillo Lopez, Gonzalez Ramirez, Prieto Garcia , Villagomez Ibarra, & Acevedo Sandoval, 2011)

La fitorremediación tiene la ventaja de no requerir transporte del sustrato contaminado, es eficiente tanto para contaminantes orgánicos como inorgánicos, es de bajo costo, no requiere de personal especializado para su aplicación, hace uso de prácticas

agronómicas convencionales, mejora las propiedades físicas y químicas del suelo, puede emplearse en agua, suelo y aire, favoreciendo el reciclado de recursos.

Sin embargo presenta algunos inconvenientes como la lentitud en el crecimiento de las especies cuando son árboles o arbustos, solo es aplicable dentro de la zona de óptimo desarrollo de la rizosfera de la planta, cuando los contaminantes se acumulan en la madera pueden volver al ambiente por combustión de la misma, requieren de áreas relativamente grandes y pueden aumentar la solubilidad de algunos contaminantes. (Delgadillo Lopez, Gonzalez Ramirez, Prieto Garcia , Villagomez Ibarra, & Acevedo Sandoval, 2011)

La fitorremediación se presenta como una alternativa sustentable, de bajo costo y con alta aplicabilidad para la rehabilitación de ambientes afectados por contaminación natural o antropogénica.

Existen seis métodos diferentes de fitorremediación que se agrupan en dos conjuntos, los que se utilizan como medio de contención (rizofiltración, fitoestabilización y fitoinmovilización) y los que se utilizan como medio de eliminación (fitodegradación, fitoextracción y fitovolatilización), dependiendo el tipo de contaminante, su cantidad y el medio en el que se encuentre dicho contaminante, se elige un método de fitorremediación u otro, siendo los más utilizados la fitoestabilización para la contención de contaminantes y la fitoextracción para su eliminación. (Arias, Betancur, Gomez, Salazar, & Hernández, 2010)

En la tabla 2, se relacionan los tipos de fitorremediación mediante los procesos fisiológicos realizados por el sistema radicular de la planta en la descontaminación del suelo; todavía es incipiente la investigación acerca de las cualidades depurativas que pueden tener las plantas por medio del sistema foliar y de los procesos fisiológicos (respiración – transpiración) que pueden estar involucrados en el proceso de depuración del aire.

**Tabla 2. Procesos de Fitorremediación ambiental**



Tipo	Proceso involucrado	Contaminación tratada
<b>Fitoextracción</b>	Las plantas se usan para concentrar los contaminantes en las partes cosechables (principalmente la parte aérea).	Diversas aguas contaminadas con cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio y zinc
<b>Rizofiltración</b>	Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar los contaminantes a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos.	Aguas contaminadas con cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc, isótopos radioactivos y compuestos fenólicos.
<b>Fitoestabilización</b>	Las plantas tolerantes se usan para reducir su movilidad y evitar el pasaje a capas subterráneas o al aire.	Lagunas de deshecho de yacimientos mineros, aguas residuales. Propuesto para fenólicos y compuestos clorados.
<b>Fitoestimulación</b>	Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos).	Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, atrazina, etc, aguas residuales agropecuarias.
<b>Fitovolatilización</b>	Las plantas captan y modifican los contaminantes o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.	Aguas residuales agropecuarias, aguas con mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano).
<b>Fitodegradación</b>	Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Aguas residuales agropecuarias, Municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenzono, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.

Fuente: (Arias, Betancur, Gomez, Salazar, & Hernández, 2010)

Los tipos de fitorremediación se basan en el rol que cumplen las plantas durante sus procesos fisiológicos normales, así como los principales mecanismos involucrados, los cuales tienen condiciones particulares que están determinadas principalmente por el tipo de contaminante, la diversidad microbiana y las propiedades del suelo.

Para los metales pesados, incluidos los metaloides, radionúclidos, y ciertos tipos de contaminantes orgánicos, se aplica la fitovolatilización, la fitoestabilización, fitoextracción o la fitofiltración; y para contaminantes orgánicos la fitodegradación y fitoestimulación. (Bernal , 2014)

**Fitoextracción:** conocida también como fitoacumulación, basada en la capacidad de algunas plantas para acumular contaminantes en sus raíces, tallos o follaje. Se utiliza principalmente para metales pesados, cierto tipo de contaminantes orgánicos y elementos e isótopos radiactivos; generalmente se emplean plantas conocidas como metalofitas o hiperacumuladoras , de las cuales se permite su crecimiento durante varias semanas o meses, para luego ser cosechadas, incineradas o utilizadas en compostaje para reciclar los metales, si las plantas se incineran las cenizas deben ser tratadas como residuos peligrosos, sin embargo el volumen de las cenizas será menor al 10% del volumen que generaría el suelo si fuera desenterrado para su tratamiento.

**Rizofiltración:** es la absorción en la raíz de los contaminantes de la zona que rodea la planta, para lo cual las plantas que son usadas son producidas en invernaderos y sembradas en la zona contaminada, donde las raíces toman el agua junto con el contaminante; se basa en hacer crecer en cultivos hidropónicos raíces de plantas terrestres con alta tasa de crecimiento y área superficial, para absorber, concentrar y precipitar metales pesados de aguas residuales contaminadas.

**Fitoestabilización:** es el uso de ciertas especies para inmovilizar los contaminantes a través de la raíz; esta biotécnica utiliza plantas que desarrollan un denso sistema radicular para reducir la disponibilidad por medio de mecanismos de secuenciación, lignificación o humidificación; este proceso reduce la movilidad del contaminante y evita la migración al agua o al aire y reduce la biodisponibilidad para la entrada en la cadena alimenticia; se puede usar en la restauración de sitios donde no hay vegetación debido a las altas concentraciones de metales en los suelos superficiales o que presentan perturbaciones de tipo físico.

**Fitodegradación:** conocida también bajo el nombre de fitotransformación; es la ruptura de contaminantes absorbidos por las plantas a través de procesos metabólicos dentro de ella y se utiliza para tratar contaminantes orgánicos como hidrocarburos aromáticos polinucleares, hidrocarburos totales del petróleo, plaguicidas, compuestos clorados, explosivos y surfactantes (detergentes); en este proceso de biodepuración los contaminantes son parcial o totalmente degradados o transformados a través de reacciones enzimáticas que realizan las plantas y los microorganismos, lo cual permite que sean asimilados por las mismas y retenidos en sus vacuolas, o fijados a estructuras celulares como la lignina, los contaminantes son degradados e incorporados en los tejidos de las plantas y lo utilizan como nutrientes, o los almacenan o degradan biológicamente a productos menos perjudiciales.

**Rizodegradación:** También conocida como fitoestimulación o biodegradación rizosférica mejorada. Consiste en la descomposición de contaminantes en el suelo a través de la actividad microbiana, los exudados de las raíces estimulan el crecimiento de microorganismos con capacidad para degradar contaminantes de tipo orgánico; las plantas a través de sus procesos metabólicos y fisiológicos liberan azúcares simples, aminoácidos, compuestos alifáticos y aromáticos, nutrientes, enzimas y oxígeno, los cuales se transportan

desde sus partes superiores hacia la raíz, lo que favorece el crecimiento de hongos y bacterias, quienes a través de sus actividades metabólicas causan la mineralización de los contaminantes. La rizodegradación es mucho más lenta que la fitodegradación.

**Fitovolatilización:** Consiste en la absorción y transpiración de un contaminante por la planta, algunas tienen la capacidad de volatilizar mercurio, selenio, contenidos en suelos, sedimentos o agua.

Ciertos elementos se transforman en la raíz, pasan a las hojas y pueden volatilizarse en el ambiente en concentraciones comparativamente más bajas; los contaminantes son absorbidos, metabolizados y transportados desde la raíz a las partes superiores, donde se liberan a la atmósfera en formas volátiles menos tóxicas o relativamente menos peligrosas, comparadas con sus formas oxidadas.

En cualquiera de los diferentes tipos de fitorremediación, es la tolerancia de las plantas a los contaminantes, este proceso está basado en la capacidad de resistir la acumulación de elevados niveles de compuestos en sus tejidos, soportados en estrategias que adoptan para adaptarse a medios expuestos a contaminación y compuestos tóxicos;

La tolerancia a metales pesados está definida por los procesos celulares en los cuales una vez han ingresado a las células, mecanismos como el establecimiento de enlaces entre los metales y la pared celular, el nivel de tolerancia de la membrana celular y las enzimas vegetales, la reducción del transporte por la membrana celular, el flujo activo de metales desde las células al exterior, la acumulación del exceso de metales en las vacuolas, la quelación del metal por ligandos orgánicos y/o inorgánicos (fitoquelatos), o por precipitación del metal, forman compuestos de baja solubilidad.

Así mismo la tolerancia a contaminantes orgánicos, en donde existen dos mecanismos por los cuales las plantas pueden incrementar su resistencia; el primero consiste en la transformación de los elementos tóxicos en la rizosfera, en el cual la planta transforma los elementos tóxicos en la rizosfera, liberando más del 20% de su fitosintato dentro del suelo en forma de exudado radicular, constituido por azúcares, alcoholes, fenoles, ácidos orgánicos y proteínas que son utilizados por las comunidades microbianas en la rizosfera.

Estas poblaciones pueden ser de 100 a 10000 veces mayores que las presentes en la matriz del suelo y se caracterizan por presentar enzimas específicas capaces de metabolizar los contaminantes hacia formas menos tóxicas.

El segundo mecanismo, se produce una vez los contaminantes atraviesan el sistema radicular, allí los elementos tóxicos pueden trasladarse hacia brotes y hojas para posteriormente volatilizarse, o pueden sufrir procesos de metabolización hacia nuevas formas, estos compuestos pueden mineralizarse o acumularse, bien sea como nutrientes o también como contaminantes. (Bernal, 2014)

Aun cuando en Colombia se ha estudiado ampliamente el campo de la microbiológica, todavía no se ha comenzado a investigar propiamente en el campo de la biodepuración de aire contaminado por actividades agropecuarias mediante el uso de esta alternativa natural, sin embargo se han realizado estudios en el uso de asociaciones entre microorganismos y plantas para la descomposición de materiales tóxicos en vertimientos por diferentes actividades industriales y el caso particular de una explotación porcícola en Antioquia.

En este ensayo se diseñó un sistema de humedal artificial en el cual se realizaba tratamiento de las aguas residuales provenientes de la unidad porcícola en estudio, en donde se evaluaba la efectividad de las especies utilizadas en la reducción de la carga contaminante contenida en las aguas residuales o purines, por medio de la acción de la biodepuración y filtrado radicular junto con la acción de los microorganismos asociados a ellas. (Arias, Betancur, Gomez, Salazar, & Hernández, 2010)

### **3. PROCESO DE ABSORCIÓN Y FIJACIÓN DE GASES A TRAVÉS DE LAS HOJAS - ESTOMAS**

Las plantas son los únicos organismos que poseen hojas, aunque no todas las plantas las tienen.

Las estructuras características de las hojas que garantizan algunos de los procesos metabólicos de las plantas son: epidermis, cutícula, estomas, células oclusivas, células del mesófilo (parénquima en empalizada y esponjoso) y vainas (Fig.3)

**Figura 3. Morfología interna de la hoja**



Fuente: (INTAGRI, 2019)

La epidermis es un tejido protector de la hoja que cubre la superficie de la planta protegiéndola de pérdidas excesivas de agua por transpiración, las células de la epidermis secretan una sustancia denominada cutina que es un polímero compuesto de ácidos grasos hidroxilados entrecruzados y que da origen a una capa lipofílica llamada cutícula. (Murillo Castillo, Piedra Marin, & León, 2013)

Las cutículas vegetales son membranas sólidas de lípidos formadas por cutina, cutan, ceras y algunos polisacáridos. La cutícula constituye la barrera principal que deben superar los solutos para iniciar el proceso de absorción dentro de la planta.

La naturaleza de la cutícula es hidrofóbica, aunque también posee componentes hidrofílicos; está compuesta por biopolímeros de alto peso molecular como la cutina y la pectina, también por ceras epicuticulares hidrofóbicas  $C_{12}-C_{72}$  y ceras incrustadas.

A pH fisiológico ( $\sim 7,4$ ) la cutícula posee una carga negativa, lo que favorece la interacción y en algunos casos la absorción de iones positivos.

La cutina está compuesta por polímeros, ácidos grasos hidroxilados y algunos ácidos hidroxiepóxicos que en conjunto poseen propiedades semihidrofílicas, dentro de este grupo de ácidos grasos esterificados aparecen grupos hidroxilo y carboxilo libres, por lo que se establece una relación hidrofílico/lipofílico en la capa de cutina, la cual influye en el proceso

de absorción, al permitir que tanto solutos polares como no polares puedan penetrar la capa cuticular.

Por su parte la pectina, se presenta en forma de fibras y está constituida por polímeros de ácido galacturónico, los cuales son los responsables de que adquiera una carga negativa. Junto con las fibras de pectina se encuentran la celulosa y la hemicelulosa, las cuales poseen grupos hidroxilos y carboxilos libres, que también aportan cargas negativas a la capa de pectina.

Los estomas son pequeños poros localizados en la superficie de las hojas, se consideran parte de la epidermis y están compuestos por células modificadas que tienen la capacidad de abrirse y cerrarse para regular el intercambio gaseoso; los estomas regulan el flujo de gases dentro y fuera de las hojas y también pueden absorber otros químicos. (Xiangying, y otros, 2017)

A través de los estomas por ejemplo, ocurre la entrada de dióxido de carbono y la salida de oxígeno, subproducto de la fotosíntesis, como también la salida de vapor de agua en los procesos de transpiración.

Los mecanismos morfológicos y fisiológicos implicados en los procesos de adaptación – aclimatación frente al estrés operan en diferentes niveles de la planta, siendo los estomas vitales en su proceso de homeostasis. (Toral, Manriquez, Navarro Cerillo, Tersí, & Naulin, 2010)

La apertura de los estomas se controla a través de cambios en el tamaño y la forma de dos células especializadas, llamadas células oclusivas, que flanquean la apertura estomática y poseen una estructura característica que les permite regular la apertura del poro estomático.

Estas estructuras se encuentran en todas las partes aéreas de la planta, pero son más abundantes en las hojas, dado que la epidermis y la cutícula de los órganos aéreos forman una capa continua y los estomas son las discontinuidades por donde la planta realiza la mayor parte del intercambio de  $O_2$ ,  $CO_2$ , vapor de agua y otros gases. (Azcon Bieto & Talón, 2013)

Los estomas se encuentran en las partes aéreas de prácticamente toda la flora terrestre, incluyendo los esporofitos de musgos, helechos gimnospermas y angiospermas.

Las hojas con estomas en ambas caras se denominan anfiestomaticas, y las que solo tienen en la epidermis inferior se denominan hipoestomaticas.

El estoma consta de un poro u ostiolo rodeado de dos células oclusivas o de guarda (Fig.4) en forma de riñón o en las gramíneas y ciperáceas en forma de pesa de gimnasia.

Los movimientos estomáticos dependen de cambios en la presión de turgencia, tanto de las células oclusivas como de las células epidérmicas adyacentes, por ejemplo las células adyacentes a veces se modifican para formar células anexas diferentes.

El conjunto de células oclusivas y anexas recibe el nombre de aparato estomático.

Los cambios en el tamaño del poro se deben a ciertas propiedades peculiares de las células oclusivas.

- a) Pueden alterar rápida y reversiblemente su turgencia (es decir su contenido hídrico) y a medida que esto sucede, el volumen de la célula cambia.
- b) La forma de la célula oclusiva a turgencia elevada y baja, depende de las propiedades de la pared. En las paredes de las células oclusivas las microfibrillas de celulosa se disponen de forma que la pared interna (próxima al poro) es menos elástica en sentido longitudinal, que la pared externa. Esto se debe, a la orientación de las microfibrillas, pero también a que la pared interna se haya a menudo engrosada. De esta forma, cuando la turgencia y el volumen celular aumentan, la pared externa se alarga más que la pared interna, y las células oclusivas adquieren forma de arco (poros abiertos) y cuando la turgencia disminuye, las células están más o menos rectas (poros cerrados).
- c) El arqueado de las células oclusivas se produce porque alcanzan un mayor contenido de solutos y por tanto, una mayor turgencia que las células epidérmicas circundantes.

Los estudios sobre mecanismos estomáticos han demostrado que en muchos casos, las células anexas poseen una ventaja mecánica sobre las oclusivas, de tal modo que aumentos iguales de presión en las células oclusivas y anexas provocan el cierre estomático.

- d) Las células oclusivas difieren del resto de las adyacentes en otras características: no están comunicadas con las células adyacentes por medio de plasmodesmos y



por lo general, los cloroplastos son menos abundantes, más pequeños y de diferente morfología que los de las células del mesófilo

La forma de los estomas es distintiva de los diferentes grupos de plantas, siendo muy conocida la diferencia entre mono y dicotiledóneas. Los patrones de desarrollo y estructura estomática, su respuesta en cuanto a tamaño, apertura, y densidad están en función de la concentración de CO<sub>2</sub>, intensidad de la luz, régimen hídrico y variación de la temperatura. (Alvarez Bello & Reinaldo Escobar, 2015)

**Figura 4. Disposición de las células epidérmicas y células oclusivas**

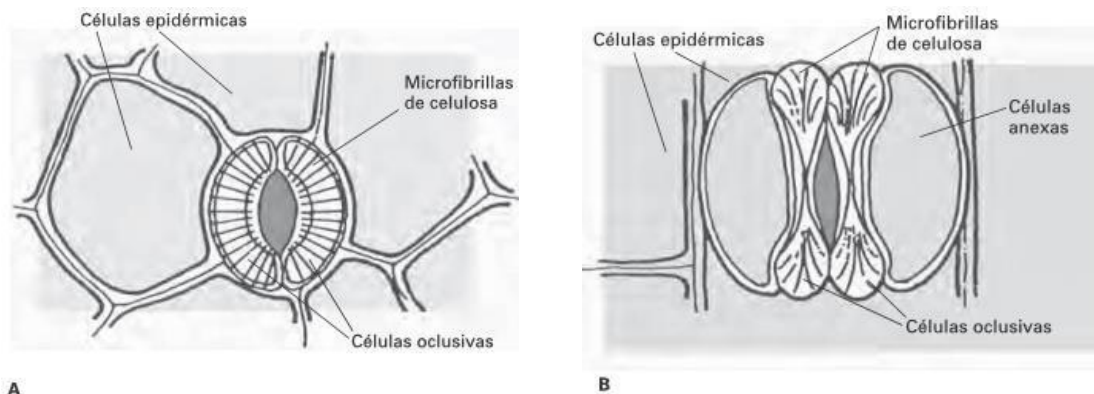


Figura 4. Disposición radial de las microfibrillas de la celulosa en las células oclusivas y células epidérmicas de estomas en forma arriñonada (A) y en forma de pesas de gimnasia en las gramíneas y ciperáceas (B).

**Fuente:** (Azcon Bieto & Talón , 2013)

Teniendo en cuenta la importancia que ejercen ciertas condiciones en el tamaño y número de estomas en las hojas y su papel en el intercambio gaseoso de las plantas, es importante considerar los diferentes mecanismos de fijación de carbono que tienen las plantas superiores.

Los estomas proporcionan a las plantas un mecanismo fundamental para adaptarse a un ambiente continuamente cambiante, permitiendo el intercambio físico activo entre las partes aéreas de la planta y la atmosfera. (Azcon Bieto & Talón , 2013)



El papel más importante de los estomas es la regulación de la pérdida de agua (transpiración) y la absorción de CO<sub>2</sub> (asimilación fotosintética del carbono)

El dióxido de carbono es un gas que se encuentra en forma natural en la atmosfera en niveles muy bajos (380 ppm aproximadamente); a pesar de ello es el sustrato principal de la fotosíntesis, ya que es la fuente de carbono para la síntesis de los distintos compuestos orgánicos de las plantas.

La concentración de CO<sub>2</sub> en el aire alrededor de las hojas influye marcadamente en el crecimiento de las plantas, pues estas tienen que incorporarlo en cantidades suficientes. La mayor parte de las plantas depende de la difusión del CO<sub>2</sub> desde la atmosfera hasta los cloroplastos, donde tendrá lugar la fijación del dióxido de carbono gracias a la actividad carboxilasa de la enzima RuBisCo. (Azcón, Fleck, Aranda, & Gómez, 2008)

Es así como la fotosíntesis puede clasificarse en las plantas C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> y plantas con metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM), que es un ejemplo de adaptación al estrés ambiental y se presenta en plantas de sitios con periodos de escasa disponibilidad de agua o de CO<sub>2</sub>.

La fotosíntesis es el principal proceso en la producción de materia orgánica vegetal y es paralelo al proceso respiratorio, que afecta el balance de carbono y la acumulación de materia orgánica.

La respiración consta de dos componentes: la respiración mitocondrial, proceso independiente de la luz y mediante la cual se libera la energía almacenada en los carbohidratos producidos durante la fotosíntesis y la fotorrespiración, que es dependiente de la luz y compite con la fotosíntesis, provocando una disminución hasta de un 50% de los productos fotosintéticos; esta última es utilizada para el crecimiento y mantenimiento de la planta. (Mosquera, Riaño, Arcila, & Ponce, 1999)

La vía fotosintética C<sub>3</sub> surgió tempranamente en la escala geológica y todas las plantas vasculares actuales descienden de una planta con este tipo fotosintético. Hace más de 420 millones de años, el cociente CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> en la atmosfera era, mucho mayor que en el presente, y este cociente disminuyó al aumentar el número de organismos fotosintéticos que liberan O<sub>2</sub> a la atmosfera, lo que provocó la ineficiencia actual de la enzima RuBisCo.

La fotosíntesis  $C_3$  (Ciclo  $C_3$  o de Calvin-Benson) que se realiza casi en el 85% de las plantas del planeta, es un proceso auto catalítico que involucra 13 etapas, las cuales transcurren en el estoma de los cloroplastos de las células fotosintéticas, y que pueden ser agrupadas en tres fases: Carboxilación, Reducción, y Regeneración. (Lara, Drincovich, & Andreo, 2000)

La reacción de Carboxilación es catalizada por la enzima RuBisCo que combina a la molécula aceptora ribulosa-1,5-bisfosfato (RuBP) con el  $CO_2$ ; el compuesto resultante es inestable, generando dos moléculas de 3-fosfoglicerato; en la fase de Reducción, este compuesto es fosforilado y reducido para formar gliceraldehído -1,3-bisfosfato (3-PGALL) utilizando ATP y el NADPH producidos en la fase luminosa de la fotosíntesis y finalmente la fase de Regeneración de la RuBP se requiere ATP y diez de las trece enzimas involucradas en esta vía.

La fotorrespiración (proceso paralelo a la fotosíntesis), también requiere de la acción de la RuBisCo, que cataliza una reacción oxidativa entre la RuBP y el  $O_2$ , que involucra la producción de 3-PGA y glicolato-2-P; El  $O_2$  y el  $CO_2$  son muy similares, tanto en forma como en propiedades químicas, y compiten por el mismo sitio activo de la RuBisCo. A pesar de que la enzima posee mayor afinidad por el  $CO_2$  que por el  $O_2$ , la concentración en el aire de  $O_2$  es mucho mayor que la del  $CO_2$ . (Lara, Drincovich, & Andreo, 2000)

Esta enzima es poco eficiente en la Carboxilación porque además de fijar  $CO_2$ , cataliza una reacción de oxigenación en el ciclo de la fotorrespiración, que no produce azúcares y utiliza energía; al competir ambas reacciones entre sí, el aumento de la fotorrespiración disminuye la eficiencia de la fotosíntesis, especialmente a temperaturas atmosféricas elevadas. (Andrade, y otros, 2007)

En diversas familias de plantas superiores, se ha desarrollado un mecanismo de acumulación de  $CO_2$ , en el mesófilo que aumenta la eficiencia de las fotosíntesis, sobre todo en climas secos y cálidos. En los años 50 estudiando la fotosíntesis en la caña de azúcar, se observó que los primeros productos marcados con  $^{14}C$  no eran el 3-PGA ni el GAP, sino ácidos como el oxalacético, el málico o el aspártico (moléculas de cuatro átomos de carbono  $C_4$ ). Las modificaciones bioquímicas que presentan las plantas  $C_4$  están asociadas a cambios morfológicos que permiten aislar, por una parte, los mecanismos de fijación inicial de  $CO_2$  en el mesófilo y, por otra su definitiva asimilación por el RuBisCo.

El resultado es una tasa de fotosíntesis muy superior al de las plantas  $C_3$ , sobre todo para conductancias estomáticas bajas, y una mayor eficiencia en el uso del agua. (Azcón , Fleck, Aranda, & Gómez, 2008)

A diferencia de la fotosíntesis  $C_3$  y  $C_4$ , en la fotosíntesis CAM, las plantas fijan el  $CO_2$  principalmente por la noche con el uso de la enzima PEPC, pero el producto de la reacción de cuatro carbonos se almacena en vacuolas, luego durante el periodo de luz consecutivo se asimila el  $CO_2$ , en los cloroplastos por el ciclo  $C_3$ . (Andrade, y otros, 2007)

La fotosíntesis CAM consiste en los siguientes pasos metabólicos:

Por la noche: 1) formación del aceptor primario del  $CO_2$ , fosfofenol-piruvato (PEP) a partir de carbohidratos no estructurales en las células fotosintéticas; 2) Fijación del  $CO_2$ , por la enzima PEP carboxilasa (PEPC) en el citosol y síntesis del ácido málico (como ión malato) en la vacuola central de las células fotosintéticas.

Durante el día: 1) liberación del malato de la vacuola hacia el citosol; 2) descarboxilación del malato en el citosol, liberación de  $CO_2$  y formación de tres carbonos (piruvato o PEP); 3) asimilación del  $CO_2$ , liberado en los cloroplastos por la enzima rubisco, seguida por el ciclo de Calvin- Benson y la regeneración de carbohidratos de reserva o gluconeogénesis.

En plantas CAM, los estomas permanecen cerrados durante el día (con el consiguiente ahorro de agua) y están abiertos durante la noche. Así, el primer producto de la fijación nocturna de  $CO_2$  es también un compuesto de cuatro carbonos y, por tanto, el inicio de la asimilación fotosintética de  $CO_2$ , tiene lugar por la noche, debido al poder reductor que se ha ido acumulando durante el día. (Azcón , Fleck, Aranda, & Gómez, 2008)

Las CAM - *Crassulaceae* o como se le conoce a esta familia en castellano **Crasuláceas**, son generalmente plantas herbáceas, algunas subarborescentes y otras pocas acuáticas o arbóreas.

Están extendidas mundialmente pero se encuentran mayoritariamente en el hemisferio norte y África meridional. Estas plantas almacenan agua en sus hojas suculentas ya que su hábitat generalmente lo conforman zonas áridas y calurosas en donde el agua es escasa.

Dentro de sus características más sobresalientes se encuentran sus hojas en disposición alterna, opuestas o en roseta basal sin estipulas, flores hermafroditas, regulares, perianto diclamídeo, con frecuencia pentámero o a veces tetrámero, hexámero y raramente multímero, cáliz a veces más o menos soldado en la base; androceo isostemono o diplostemono, soldado al tubo de la corola; gineceo súpero con varios carpelos libres soldados en la base. Inflorescencias a menudo cimosas. Frutos capsulares o foliculares.

Los estomas de las plantas CAM permanecen abiertos durante la noche y cerrados durante la mayor parte del día, resultando de esta manera en una pérdida mínima de agua y fotorrespiración reducida; por lo tanto las plantas CAM exhiben tasas en la eficiencia del uso del agua (WUE), cinco a diez veces más altas que las plantas  $C_4$ , resultando en una considerable ventaja competitiva en ambientes en que el agua es el factor limitante como por ejemplo desiertos o ambientes epífitos. (Geydan & Melgarejo, 2005)

El metabolismo CAM se encuentra en pteridófitos, gimnospermas y angiospermas, presentándose en este último grupo tanto en dicotiledóneas como en monocotiledóneas, abarcando 33 familias y 328 géneros.

Dado que la longitud de los estomas varía de 10 a  $80\mu\text{m}$  y las densidades varían de 5 a  $1000\text{ mm}^2$  según las especies de plantas y las condiciones ambientales, las áreas de poros estomáticos varían de 46 a  $125\mu\text{m}^2$  por lo tanto, los estomas pueden desempeñar papeles descontaminantes al retener o adsorber PM 2.5 y PM10 (Xiangying, y otros, 2017)

Es así como los estomas se constituyen como las estructuras que permiten el intercambio gaseoso entre las plantas y la atmósfera, para este caso las emisiones de gases contaminantes antropogénicos además de la captura de material particulado (PM); esto debido al tamaño y densidad de área ocupada por las hojas de las plantas en una determinada área.

#### **4. REDUCCIÓN DE COMPUESTOS CONTAMINANTES ATMOSFERICOS POR FITOREMEDIACIÓN**

La capacidad de las plantas para eliminar los contaminantes del aire a través de la absorción estomática (absorción) y de la deposición no estomática (adsorción) aún es un

proceso gran parte desconocido y se encuentra en investigación y desarrollo. (Brilli, y otros, 2018)

Se han realizado estudios y ensayos para establecer el grado de depuración del aire en ambientes de pequeño tamaño y en confinamiento, de contaminantes derivados de pinturas, hidrocarburos y otros materiales que tienen estos componentes tóxicos y que normalmente hacen parte de espacios como oficinas, hogares, medios de transporte y demás lugares en los que el ser humano pasa la mayor parte de su tiempo.

Sin embargo es desconocido el nivel de contaminación atmosférica generada por los sistemas de explotación pecuaria y por supuesto los métodos de mitigación y control que podrían implementarse en estas instalaciones como lo es la fitorremediación.

#### **4.1 Fitorremediación del aire en espacios internos de COVs (Compuestos Orgánicos Volátiles)**

La exposición a un ambiente químico cada vez más complejo ha aumentado la presentación de enfermedades a nivel respiratorio; los compuestos orgánicos volátiles (COV) representan una categoría de productos químicos ambientales son una importante contribución en la reducción de la calidad del aire. (Creighton, Kwang, & Stanley, 2015)

Los COV son sustancias químicas orgánicas que cuando se mezclan con óxidos de nitrógeno, reaccionan para formar ozono (a nivel del suelo o troposférico), lo cual es peligroso para los organismos vivos; tienen un punto de ebullición bajo y una presión de vapor alta a temperatura ambiente, esto provoca que grandes cantidades de moléculas se evaporen en el aire circundante.

Se liberan durante la quema de combustibles, madera, carbón, gas natural, disolventes, pinturas, adhesivos, plásticos, aromatizantes, y otros productos de procesos industriales.

Los efectos sobre la salud involucran problemas asociados al sistema nervioso, hepático, renal y respiratorio, se han reportado casos de hematotoxicidad después de una exposición de  $\sim 12\text{mg/m}^3$  de benceno durante un periodo de 4 semanas. (Pettit, Irga, & Torpy, 2018)

Los efectos en la salud ocasionados por la exposición a formaldehído en interiores incluyen irritación de los ojos, enrojecimiento de los ojos, parpadeo frecuente e irritación del

sistema respiratorio superior, también puede causar efectos a largo plazo como cáncer, leucemia en niños, nacimiento prematuro, bajo peso al nacer, anomalías congénitas, genotoxicidad y enfermedad de Alzheimer (Teiri, Pourzamani, & Hajizadeh, 2018)

Los COV son numerosos, ubicuos, incluidos los compuestos químicos naturales y antropogénicos; participan en las reacciones fotoquímicas atmosféricas que contribuyen a la formación de  $O_3$  y también desempeñan un papel en la formación de aerosoles orgánicos secundarios, que se encuentran en el PM (material particulado). (Xiangying, y otros, 2017)

Las principales especies de COV en espacios interiores incluyen el tolueno, benceno, óxido de estireno, percloroetileno, el formaldehído, el estireno que entre otras son disruptores endocrinos. (Pettit, Irga, & Torpy, 2018)

Dentro de los COVs producidos por los sistemas de producción pecuaria se encuentran el acetaldehído ( $C_2H_4O$ ), Ácido butírico ( $C_4H_8O_2$ ), amoníaco ( $NH_3$ ), Clorofenol ( $C_6H_5ClO$ ), Dicloruro de azufre ( $SCl_2$ ), Etil mercaptano ( $C_2H_5SH$ ), Etil acrilato ( $C_5H_8O_2$ ), Estireno ( $C_8H_8$ ), Monometil amina ( $CH_5N$ ), Metil mercaptano ( $CH_3SH$ ), Nitrobenceno ( $C_6H_5NO_2$ ), Propil mercaptano ( $C_3H_8S$ ), Butil mercaptano ( $C_4H_{10}S$ ), Sulfuro de dimetilo ( $C_2H_5S$ ), sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ). (Min. Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010)

Son muchas las investigaciones y los métodos de eliminación de COVs desarrollados para la biodepuración de espacios interiores, variando ampliamente en costo y efectividad; Entre estos, se encuentran los basados en sistemas de adsorción, fotocatalisis o reacción con ozono, pero están limitados por sus altos costos de instalación y mantenimiento ya que son dependientes de sistemas de calefacción y refrigeración para su óptimo funcionamiento, encontrando como alternativa natural y de bajo costo la eliminación de estos compuestos contaminantes por medio de plantas ornamentales en el interior de las edificaciones. (Creighton, Kwang, & Stanley, 2015)

Como parte del programa espacial tripulado, científicos de la NASA en la década de 1980, encontraron que ciertas especies de plantas y sus microorganismos asociados, eliminaron los COVs de manera efectiva en pequeños espacios cerrados, purificando la atmósfera interna de las cabinas de las aeronaves; sin embargo cuando las plantas de interior fueron probadas *in situ*, para probar su capacidad de biodepuración de COV en edificios, los resultados no fueron contundentes, dejando abierta la pregunta si las plantas realmente

representan una solución viable para modular la concentración de estos contaminantes dentro del entorno de los edificios. (Creighton, Kwang, & Stanley, 2015)

Creighton y colaboradores realizaron un modelo matemático que puede establecer la densidad de plantas a emplear, para depurar COVs de una área interna determinada, encontrando que al comparar la tasa de fitorremediación en salas selladas de  $60\text{m}^3$  y cámaras pequeñas de  $1\text{m}^3$  en condiciones idénticas, la tasa de eliminación en las salas fue de 1/20 respectivamente; sobre este resultado para obtener una reducción equivalente en concentración de COV del 67% en una casa de  $300\text{m}^3$  se requeriría de 360 o 750 plantas dependiendo la especie *Gardenia jasminoides* vs *Rosmarinus officinalis*.

Así mismo establecieron que la vida media de la descomposición de COVs varía con el volumen de la sala, por lo que salas más grandes no podrían eliminar COVs tan rápidamente, lo cual se mejoraría aumentando el número de plantas y su volumen ocupado.

Al probar las plantas en salas de oficina con volúmenes de 275 y  $350\text{m}^3$ , que contenían de 16 a 19 ocupantes con 22 a 25 plantas por oficina, no se encontró reducción en las concentraciones de benceno, tolueno, etileno o xileno.

Observaron también que la eficiencia de eliminación de formaldehído por partes aéreas de la planta frente a la zona de la raíz fue de 1:1 durante el día, pero disminuyó a 1:11 por la noche cuando los estomas se cerraron, es decir que la eliminación de COV por las partes aéreas de las plantas varía según las especies de plantas y el COV en cuestión.

En un ensayo realizado por Teiri y colaboradores, evaluaron la efectividad de la fitorremediación de formaldehído por la especie *Chamaedorea elegans* dentro de una cámara de 375 litros (84cm de largo, 62 cm de ancho y 72 cm de altura) bajo ambiente controlado, demostrando una eliminación eficaz del aire contaminado entre un 65 – 100% dependiendo las concentraciones de entrada de este componente ( $0,66 - 16,4\text{mg}/\text{m}^3$ ).

Los resultados demostraron una capacidad máxima de eliminación de  $1,47\text{mg}/\text{m}^2$ , alcanzado con una concentración de formaldehído de entrada de  $14,6\text{mg}/\text{m}^3$ . Concentraciones de  $16,4\text{mg}/\text{m}^3$  del gas no fueron lo suficientemente altas para afectar el crecimiento de las plantas sin embargo hubo una disminución en el contenido de clorofila, carotenoides y agua de las plantas sometidas al estudio. (Teiri, Pourzamani, & Hajizadeh, 2018)

Este estudio mostro que el sistema planta – suelo elimino considerablemente los vapores de formaldehido del aire de la camara durante una exposicion prolongada con una concentracion de este gas entre 0,66-11,72mg /m<sup>3</sup>; sin embargo al aumentar la concentracion de entrada a 14,58 – 16,37 mg /m<sup>3</sup> en 48 horas, la eficiencia en la eliminacion se redujo notablemente, demostrando que la planta no podia tolerar concentraciones superiores a 12mg/m<sup>3</sup> al llegar a su estado de saturacion de este compuesto.

#### **4.2 Biodepuración del aire por medio de asociación de plantas y microbiota**

Los brotes de las plantas o los órganos por encima del suelo, son colonizados por una gran variedad de bacterias, levaduras y hongos, a este medio se le conoce filosfera.

La estrecha asociación entre especies de plantas y comunidades microbianas especificas en la filosfera sugiere su adaptación y relaciones coevolutivas, la diversidad bacteriana en las hojas media las relaciones entre la biodiversidad de las plantas y la función del ecosistema.

Investigaciones documentan que las hojas de las plantas asociadas a microorganismos mitigan los contaminantes del aire, como en el caso de las hojas de Azalea y las *Pseodomonas* en la reducción de los COV (compuestos orgánicos volátiles), o las hojas de Altramuz amarillo con *Burkholderia endofitica cepacia* para la reducción de tolueno, o también la asociación entre las hojas de Alamo y *Methylobacterium sp.* en la disminución de los compuestos xenobicos. (Xiangying, y otros, 2017)

Se estima que la filosfera tiene un área de 4 x 10<sup>8</sup> km<sup>2</sup> en la tierra y es el hogar de millares de células bacterianas; las comunidades bacterianas de la filosfera están normalmente dominadas por las proteobacterias, como *Methylobacterium*, *Sphingomonas*, *Beijerinckia*, *Azotobacter*, *Klebsiella*, cianobacterias como *Nostroc*, *Scytonema* y *Stigonema*; los hongos dominantes en la filosfera incluyen *Ascomycota*, de los generos *Aureobasidium*, *Cladosporium* y *Thaphrina*; al igual que las levaduras *basidiomycetous* pertenecientes a los generos *Cryptococcus* y *Sporobolomyces*.

Los microbios pueden ser epifitos viviendo en la superficie de los órganos de las plantas y/o endófitos dentro de los tejidos de las plantas sin causar enfermedad aparente.



La asociación entre las plantas y comunidades microbiales pudieren llegar a ser simbiosis en la utilización de componentes contaminantes del aire.

**Figura 5. Ilustración esquemática de la Filosfera**

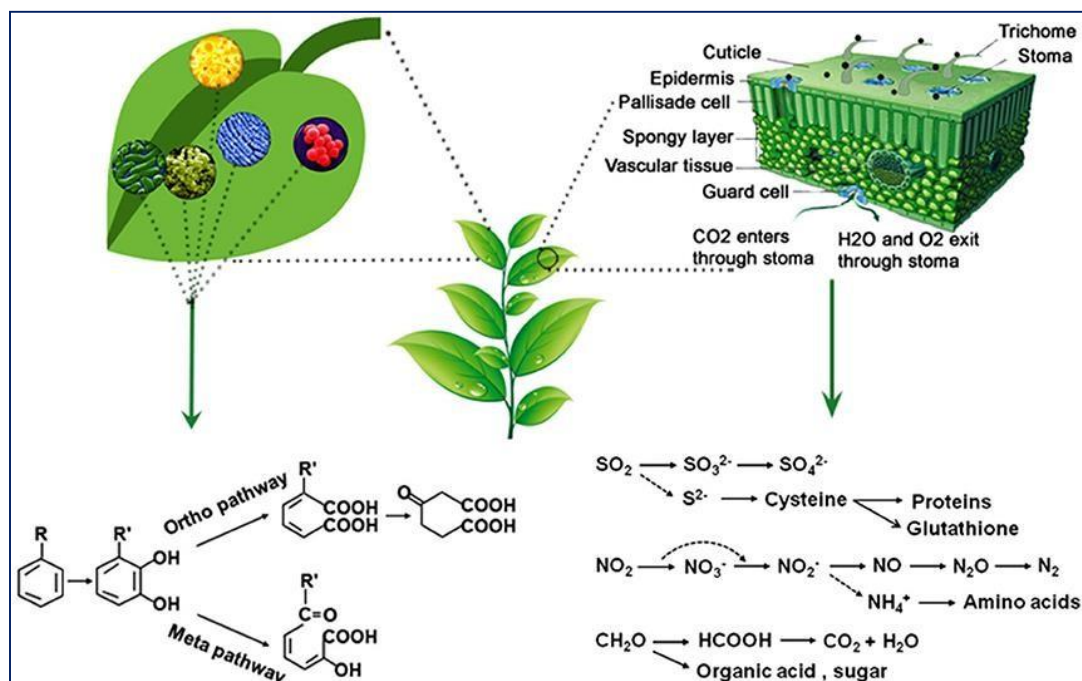


Figura 5. El panel central representa la parte aérea de una planta. El panel derecho muestra una sección transversal esquemática ampliada de una hoja donde la superficie de la hoja y los tricomas pueden retener la materia particulada (PM) y los estomas absorben PM, así como la forma en que las hojas pueden asimilar el  $SO_2$ ,  $NO_2$  y  $CH_2O$  (formaldehído) a compuestos orgánicos simples, aminoácidos o proteínas. El panel izquierdo representa una superficie de la hoja ampliada con bacterias, que pueden biodegradarse o transformarse en compuestos orgánicos volátiles en menos tóxicos o no tóxicos como el benceno y sus derivados que pueden degradarse a través de la vía Orto o Meta.

**Tabla 3. Asociación de plantas y microorganismos capaces de biodegradar o biotransformar los contaminantes de aire**

Plantas	Microbios	Contaminante	Referencias
<i>Acorus calamus</i> var. <i>angustatus</i>	<i>Methylobacterium</i> sp.	Metanol	Iguchi et al., 2012
<i>Amaranthus cruentus</i>	<i>Alcaligenes faecalis</i> y <i>Alcaligenes</i> sp.11SO	Naftalina y fenantreno	LJS, 2016
<i>Ammonia muricana</i>	<i>Pseudomonas</i> sp, <i>Alcaligenes</i> sp y <i>Micrococcus roseus</i>	Hidrocarburo	Ilori et al., 2006
<i>Arabidopsis thaliana</i>	<i>Hyphomicrobium</i> sp,	Clorometano	Nadalig et al., 2011
<i>Arabidopsis thaliana</i>	<i>Achromobacter xylosoxidans</i> F3B	Contaminantes fenólicos	Ho et al., 2012
<i>Arachis hypogaea</i>	<i>Arthrobacter nitroguajacolicus</i> , <i>Achromobacter xylosoxidans</i> , <i>Bacillus thiooxidans</i> , <i>Microbacterium natoriense</i> , <i>Kocuria rosea</i> , <i>Dyadobacter fermentans</i> y <i>Klebsiella pneumoniae</i>	n-alcanos	Al-Awadhi et al., 2012
<i>Azalea indica</i>	<i>Pseudomonas putida</i> TVA8	Tolueno	De Kempeneer et al., 2004
<i>Boerhavia diffusa</i>	<i>Rhodococcus corynebacterioides</i> y <i>Exiguobacterium arabatum</i>	n-alcanos	Al-Awadhi et al., 2012
<i>Bugavilla buttiana</i>	<i>Enterobacter cloacae</i> LSRC11, <i>Staphylococcus</i> sp. A1 y <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Xileno	Sangthong et al., 2016

Plantas	Microbios	Contaminante	Referencias
<i>Cahystegia soldanella</i>	<i>Hyphomicrobium</i> sp.	Metanol	Iguchi et al., 2012
<i>Album de chenopodium</i>	<i>Burkholderia fungorum</i>	n-alcanos	Al-Awadhi et al., 2012
<i>Chenopodium Murale</i>	<i>Gordonia polyisoprenivorans</i>	n-alcanos	Al-Awadhi et al., 2012
<i>Chenopodium Murale</i>	<i>Flavobacterium</i> sp., <i>Halomonas</i> sp. Y <i>Arthrobacter</i> sp.	Hidrocarburos volátiles	Ali et al., 2015
<i>Chrysopogon zizanioides</i>	<i>Achromobacter xylosoxidans</i> F3B	Compuestos BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno)	Ho et al., 2013
<i>Clitoria ternatea</i>	<i>Bacillus cereus</i>	Formaldehído	Khaksar et al., 2016b
<i>Conocarpus lancifolius</i>	<i>Flavobacterium</i> sp., <i>Halomonas</i> sp. Y <i>Arthrobacter</i> sp.	Hidrocarburos volátiles	Ali et al., 2015
<i>Cucumis sativus</i>	<i>Arthrobacter ureafaciens</i> , <i>Arthrobacter aureus</i> y <i>Microbacterium natoriense</i>	n-alcanos	Al-Awadhi et al., 2012
<i>Cynodon</i> spp.	<i>Rhodococcus</i> sp. y <i>Pseudomonas</i> sp.	Aceite volátil hidrocarburos petróleo crudo, n-hexadecano o fenantreno	Sorkhoh et al., 2011
<i>Eichhornia crassipes</i>	<i>Methylophilus</i> sp.	Metanol	Iguchi et al., 2012

<i>Ervatamia divaricata</i>	<i>Alcaligenes feacalis</i> y <i>Alcaligenes</i> sp.11SO	Naftalina y fenantreno	LJS, <a href="#">2016</a>
<i>Fraxinus excelsior</i>		Tricloroetileno, Tolueno	Weyens et al., <a href="#">2009a</a>
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	<i>Acinetobacter</i> sp., <i>Alcaligenes</i> sp. Y <i>Rhodococcus</i> sp.	Fenol	Sandhu et al., <a href="#">2009</a>
<i>Gazania rigens</i>	<i>Methylobacterium populi</i> , <i>Gordonia lacunae</i> , <i>Dietzia maris</i> , <i>Microbacterium oleivorans</i> y <i>Pseudomonas stutzeri</i>	n-alcanos	Al-Awadhi et al., <a href="#">2012</a>
<i>Gazania rigens</i>	<i>Flavobacterium</i> sp., <i>Halomonas</i> sp. Y <i>Arthrobacter</i> sp.	Hidrocarburos volátiles	Ali et al., <a href="#">2015</a>
<i>Gossypium hirsutum</i> 'MCU12'	<i>Methylobacterium gossypicola</i> sp. nov.	Metanol y diclorometano	Madhaiyan et al., <a href="#">2012</a>
<i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	<i>Alcaligenes feacalis</i> y <i>Alcaligenes</i> sp.11SO	Naftalina y fenantreno	LJS, <a href="#">2016</a>
<i>Hedera</i> spp.	<i>Hymenobacter</i> sp. y <i>Sphingomonadaceae</i> sp.	PMs	Smets et al., <a href="#">2016</a>
<i>Ixora chinensis</i>	<i>Alcaligenes feacalis</i> y <i>Alcaligenes</i> sp.11SO	Naftalina y fenantreno	LJS, <a href="#">2016</a>
<i>Ixora</i> spp.	<i>Acinetobacter</i> sp. y <i>Pseudomonas</i> sp. <i>Pseudoxanthomonas</i> sp., Y <i>Mycobacterium</i> sp.	Hidrocarburos aromáticos policíclicos	Yutthammo et al., <a href="#">2010</a>
<i>Ixora</i> spp.	<i>Pseudomonas</i> sp., <i>Microbacterium</i> sp., <i>Rhizobium</i> sp. Y <i>Deinococcus</i> sp.	Fenantreno	Waight et al., <a href="#">2007</a>

Plantas	Microbios	Contaminante	Referencias
<i>Keteleeria davidiana</i>	<i>Methylobacterium</i> sp. y <i>Methylophilus</i> sp.	Metanol	Iguchi et al., <a href="#">2012</a>
<i>Lolium multiflorum</i> lam.	<i>Pseudomonas</i> sp. Ph6-gfp	Fenantreno	Sun et al., <a href="#">2014</a>
<i>Lolium multiflorum</i> var. Tauro	<i>Pseudomonas</i> sp. ITS110, ITRI15, ITRH76 y BTRH79	Hidrocarburo	Yousaf et al., <a href="#">2010</a>
<i>Lolium perenne</i>	<i>Pseudomonas</i> sp.	Hidrocarburos de petróleo	Kukla et al., <a href="#">2014</a>
<i>Lotus corniculatus</i> var. León	<i>Pseudomonas</i> sp. ITS110, ITRI15, ITRH76 y BTRH79	Hidrocarburo	Yousaf et al., <a href="#">2010</a>
<i>Magnifera indica</i>	<i>Pseudomonas</i> sp., <i>Alcaligenes</i> sp. Y <i>Micrococcus roseus</i>	Hidrocarburo	Ilori et al., <a href="#">2006</a>
<i>Malus pumila</i>	<i>Arthrobacter</i> sp.	4-clorofenol	Scheublin y Leveau, <a href="#">2013</a>
<i>Mattiola incana</i>	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i> , <i>Pseudomonas putida</i> , <i>Planomicrobium glaciei</i> , <i>Arthrobacter agilis</i> , <i>Kucuria turfanensis</i> , <i>Pseudomonas geniculata</i> , <i>Chryseobacterium taeanense</i> , <i>Flavobacterium ahuensis</i> y <i>Microbacterium oxydans</i>	n-alcanos	Al-Awadhi et al., <a href="#">2012</a>
<i>Mesembryanthemum nodifloru</i>	<i>Nesterenkonia jeotgali</i> , <i>Nesterenkonia lacusekhoensis</i> y <i>Agrococcus terreus</i>	n-alcanos	Al-Awadhi et al., <a href="#">2012</a>
<i>Oryza sativa</i>	<i>Methylobacterium</i> sp.	Metanol	Knief et al., <a href="#">2012</a>
<i>Phaseolus vulgaris</i>	<i>Microbacterium</i> sp. y <i>Citrobacter freundii</i>	Petróleo crudo, fenantreno y n-octadecano.	Ali et al., <a href="#">2012</a>
<i>Phaseolus vulgaris</i>	<i>Arthrobacter chlorophenolicus</i>	4-clorofenol, hidroquinona	Scheublin et al., <a href="#">2014</a>
<i>Phaseolus vulgaris</i>	<i>Pseudomonas</i> sp. CF600	Fenol	Sandhu et al., <a href="#">2007</a>
<i>Phragmites australis</i>	<i>Hyphomicrobium</i> sp.	Metanol	Iguchi et al., <a href="#">2012</a>
<i>Picea abies</i>		Ácido tricloroacético	Forczek et al., <a href="#">2004</a>
<i>Pisum sativum</i>	<i>Pseudomonas putida</i> VM1441 (pNAH7)	Hidrocarburos poliaromáticos (HAP)	Germaine et al., <a href="#">2009</a>
<i>Pisum sativum</i>	<i>Microbacterium</i> sp. y <i>Rhodococcus</i> sp.	Petróleo crudo, fenantreno y n-octadecano.	Ali et al., <a href="#">2012</a>
<i>Pisum sativum</i>	<i>Agromyces fucosus</i> , <i>Agrococcus jenensis</i> , <i>Paenibacillus polymixa</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Bacillus megaterium</i> , <i>Brevibacillus brevis</i> , <i>Bacillus Neolsonii</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Arthrobacter ramosus</i> , <i>Microbacterium imperial</i> , <i>Bacillus endophyticus</i> y <i>Cellulosimicium cellliss</i>	n-alcanos	Al-Awadhi et al., <a href="#">2012</a>
<i>Poaceae</i> spp.	<i>Hyphomicrobium</i> sp.	Metanol	Iguchi et al., <a href="#">2012</a>
<i>Populus deltoides</i>	<i>Pseudomonas putida</i> W619-TCE	Tricloroetileno (TEC)	Weyens et al., <a href="#">2009b</a>

Plantas	Microbios	Contaminante	Referencias
<i>Populus deltoides</i> × <i>nigra</i>	<i>Methylobacterium</i> sp.	2,4,6-trinitrotolueno, hexahidro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazina, y octahidro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5-tetrazocina	Van Aken et al., <a href="#">2004</a>
<i>Populus trichocarpa deltoides</i>	<i>Burkholderia cepacia</i> VM1468	Tolueno	Taghavi et al., <a href="#">2005</a>
<i>Pyrus calleryana</i>	<i>Methylobacterium</i> sp. y <i>Methylophilus</i> sp.	Metanol	Iguchi et al., <a href="#">2012</a>
<i>Quercus phillyraeoides</i>	<i>Methylobacterium</i> sp. y <i>Methylophilus</i> sp.	Metanol	Iguchi et al., <a href="#">2012</a>
<i>Quercus robur</i>		Tricloroetileno, tolueno	Weyens et al., <a href="#">2009a</a>
<i>Salix Discolor</i> Clone S-365	<i>Pseudomonas putida</i> PD1	Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)	Khan et al., <a href="#">2014</a>
<i>Salix purpurea</i> clon 94006	<i>Pseudomonas putida</i> PD1	Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)	Khan et al., <a href="#">2014</a>
<i>Salsola baryosma</i>	<i>Halomonas marisflava</i> y <i>Salinococcus hispanicus</i>	n-alcanos	Al-Awadhi et al., <a href="#">2012</a>
<i>Sonchus oleraceus</i>	<i>Flavobacterium</i> sp., <i>Halomonas</i> sp. Y <i>Arthrobacter</i> sp.	Hidrocarburos volátiles	Ali et al., <a href="#">2015</a>
<i>Sonchus oleraceus</i>	<i>Flavobacterium</i> sp., <i>Halomonas</i> sp. Y <i>Arthrobacter</i> sp.	Hidrocarburos volátiles	Ali et al., <a href="#">2015</a>
<i>Tecoma stans</i>	<i>Afipta genosp</i> y <i>Microbacterium hydrocarbonoxydans</i> y <i>Bacillus subtilis</i>	n-alcanos	Al-Awadhi et al., <a href="#">2012</a>
<i>Tecoma stans</i>	<i>Flavobacterium</i> sp., <i>Halomonas</i> sp. y <i>Arthrobacter</i> sp.	Hidrocarburos volátiles	Ali et al., <a href="#">2015</a>
<i>Vicia faba</i>	<i>Flavobacterium</i> sp., <i>Halomonas</i> sp. y <i>Arthrobacter</i> sp.	Hidrocarburos volátiles	Ali et al., <a href="#">2015</a>
<i>Vicia faba</i>	<i>Rhodococcus</i> sp. y <i>Pseudomonas</i> sp.	Aceite volátil hidrocarburos petróleo crudo, n-hexadecano o fenantreno	Sorkhoh et al., <a href="#">2011</a>
<i>Vigna unguiculata</i>	<i>Microbacterium arabinogalactanolyticum</i> y <i>Pseudomonas oryziabians</i>	n-alcanos	Al-Awadhi et al., <a href="#">2012</a>
<i>Viola x wittrockiana</i>	<i>Methylobacterium</i> sp. y <i>Methylophilus</i> sp.	Metanol	Iguchi et al., <a href="#">2012</a>
<i>W. religiosa</i>	<i>Acinetobacter</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Pseudoxanthomonas</i> sp. y <i>Mycobacterium</i> sp.	Hidrocarburos aromáticos policíclicos	Yutthamm et al., <a href="#">2010</a>
<i>Zamioculcas zamiifolia</i>	<i>Bacillus cereus</i>	Formaldehido	Khaksar et al., <a href="#">2016a</a>
<i>Zamioculcas zamiifolia</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> y <i>Bacillus cereus</i>	Etilbencina	Toabaita et al., <a href="#">2016</a>
<i>Zea mays</i>	<i>Pseudomonas</i> sp. CF600	Fenol	Sandhu et al., <a href="#">2007</a>



**Fuente:** (Xiangying, y otros, 2017)

#### **4.3 Remediación de Material Particulado (PM)**

Según un estudio sobre la deposición de PM en hojas de cinco especies de hoja perenne en Beijing, China, mostro que PM con diámetro hasta  $2\mu\text{m}$  se encontraba en la cavidad estomática. (Song et al.,2015) Rai (2016) estudiaron los efectos del PM en 12 especies de plantas comunes al borde de la carretera y encontraron que los tamaños de los estomas se redujeron debido a la deposición de polvo en el aire, pero el crecimiento de las plantas no se vio afectado, lo que sugiere el potencial de las plantas en la adsorción de contaminantes del aire.

Nowak et al (2004) mostraron que los arboles dentro de las ciudades eliminaban partículas finas de la atmosfera y, en consecuencia, mejoraban la calidad del aire y la salud humana; toda la eliminación de PM se atribuye a las hojas de las plantas, pero se desconoce si la micro biota de la Filosfera podría descomponer el PM y si los elementos minerales liberados del PM podrían convertirse en nutrientes para la planta. (Xiangying, y otros, 2017)

#### **4.4 Remediación de $\text{SO}_2$**

Bacterias oxidantes del azufre como *Beggiatoa* y *Paracoccus*, pueden oxidar compuestos de azufre reducido como  $\text{H}_2\text{S}$  a azufre inorgánico y tiosulfato para formar ácido sulfúrico.

Bacterias reductoras de sulfato como *Archaeoglobus* y *Desulfotomaculum* pueden convertir compuestos de azufre en sulfuro de hidrogeno; la oxidación del  $\text{H}_2\text{S}$  produce azufre elemental ( $\text{S}^0$ ), que se completa con las bacterias fotosintéticas de azufre verde y purpura y algunos quimiolitotropos; la oxidación adicional del azufre elemental produce sulfato, el sulfato se asimila a través de la ruta de activación del sulfato, que consiste en tres reacciones de 5'-fosforilacion de adenosina (APS), la hidrolisis de GTP y la 3'- fosforilación de APS para producir 3'-fosfoadenosina 5'- fosfosulfato (PAPS).

Se ha demostrado que las bacterias reductoras de sulfato usan hidrocarburos en cultivos puros, que pueden usarse para la biorremediación de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno en suelos contaminados, dichas bacterias también pueden colonizar las superficies de las hojas y podrían usarse para la remediación de contaminantes del aire.

Las plantas pueden asimilar rápidamente el SO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S en grupos reducidos de azufre, como la cisteína y los sulfatos; un análisis reciente en el transcriptoma de las respuestas de especies del genero *Arabidopsis* al SO<sub>2</sub> mostro que la adaptación de la plantas evoca una reprogramación exhaustiva de las vías metabólicas que incluyen NO y las moléculas de señalización de especies reactivas de oxígeno y también las vías de respuesta de defensa de la planta; el estudio revelo que las respuestas de las plantas al estrés con SO<sub>2</sub> se encuentran en el nivel de transcripción con activación inicial de tolerancia cruzada y seguidas por las vías de asimilación de azufre.

El metabolismo de la cisteína en particular, está asociado con la respuesta de las plantas al estrés, lo que mejora su crecimiento en suelos donde el suministro de azufre es limitado.

A un nivel atmosférico de 79ng/m<sup>3</sup> de SO<sub>2</sub>, la asimilación de azufre por parte de la hoja podría encontrarse entre el 10 – 40 %, por ejemplo concentraciones elevadas de SO<sub>2</sub> alrededor de manantiales naturales de CO<sub>2</sub> mejoran la acumulación de metabolitos de azufre y proteínas en la vegetación circundante, por ende las plantas pueden seleccionarse para crecer en ambientes contaminados con SO<sub>2</sub>.

#### **4.5 Remediación de NOx**

Hay varios óxidos de nitrógeno (N) en la atmosfera: dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), trióxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y pentaóxido de dinitrogeno (N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Entre ellos la USEPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) regula el NO<sub>2</sub> que es la forma más frecuente de NOx generada antropogénicamente y además porque participa en la formación de O<sub>3</sub> y NO.

Bacterias como *Azotobacter* y *Rhizobium*, junto con hongos como las micorrizas, a menudo se asocian con las raíces de las plantas siendo capaces de fijar N atmosférico; las cianobacterias pueden usar una variedad de fuentes orgánicas como inorgánicas de N combinado, como nitrato, nitrito, amonio, urea o algunos aminoácidos.

Las bacterias nitrificantes incluidas las especies de los géneros *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrobacter* y *Nitrococcus*, oxidan el amoniaco a hidroxilamina y la nitrito oxidoreductasa oxida el nitrito a nitrato, estas bacterias nitrificantes prosperan en los suelos,

lagos, ríos y arroyos con altas entradas y salidas de aguas residuales debido al alto contenido de amoníaco.

Las bacterias diazotroficas de la Filosfera, como *Beijerinckia*, *Azotobacter*, y *Klebsiella*, así como cianobacterias como *Nostoc*, *Scytonema* y *Stigonema*, pueden usar dinitrógeno atmosférico ( $N_2$ ) como fuente de nitrógeno.

Este se fija mediante la enzima nitrogenasa, codificada por los genes *nif*; la presencia de estas bacterias fijadoras de  $N_2$  mejora la tolerancia a la sequía, lo que sugiere la adaptabilidad a las plantas cultivadas en diferentes condiciones ambientales.

Morikawa et al. (1998) estudiaron 217 especies herbáceas y leñosas en la absorción de  $NO_2$  y encontraron que las plantas diferían en la absorción y asimilación de  $NO_2$ .

Las plantas leñosas más eficientes incluyeron *Eucalyptus viminalis*, *Populus nigra*, *Magnolia kobu* y *Robinia pseudoacacia*, y dentro de las herbáceas se incluyen la *Erechtites hieracifolia*, *Crassocephalum crepidioides* y *Nicotiana tabacum*.

#### 4.6 Remediación de $O_3$

El  $O_3$  antropogénico se genera a partir de la reacción de  $O_2$  atmosférico con los radicales  $O$  del estado fundamental que resultan de la disociación fotolítica del  $NO_2$  ambiental. Por lo tanto la presencia de  $NO$  y  $NO_2$  en la atmósfera está estrechamente relacionada con el nivel del suelo de  $O_3$ .

El ozono se considera un agente antimicrobiano eficaz contra algunas bacterias y hongos, la absorción de este gas por parte de las plantas se debe principalmente a los estomas, el  $O_3$  se disuelve fácilmente en agua y reacciona con estructuras apoplásticas y membranas plasmáticas para formar especies reactivas de oxígeno (ROS), como los radicales  $O_3$ ,  $H_2O_2$  y  $OH$ .

El  $O_3$  o ROS pueden alterar la integridad de la membrana celular y atacar grupos sulfhidrilo (SH) o aminoácidos en el anillo de la proteína, lo que causa fitotoxicidad; los síntomas de las lesiones incluyen manchas blancas, amarillas o marrones en la superficie superior de las hojas.

Las concentraciones umbral que causan una reducción del rendimiento del 10% son  $80\mu g/m^3$  para cultivos sensibles y  $150\mu g/m^3$  para los cultivos más resistentes. La adaptación



de las plantas al estrés por  $O_3$  ha resultado en que las plantas desarrollen mecanismos contra la toxicidad del  $O_3$ .

En primera instancia el  $O_3$ , se puede eliminar del aire mediante reacciones químicas con compuestos reactivos emitidos por la vegetación particularmente los monoterpenos (Di Carlo et al., 2004); en segundo lugar los compuestos orgánicos semivolátiles, como los diferentes diterpenoides exudados por los tricomas en las hojas, son un sumidero suficiente de  $O_3$ , un ejemplo de esto lo hacen las hojas de tabaco que pueden segregar el diterpenoide cis-abienol, que actúa como un poderoso escudo de protección química contra la captación estomática de  $O_3$  en la superficie de la hoja.

## **5. ESPECIES ORNAMENTALES CON POTENCIAL BIODEPURANTE DEL AIRE**

En la década de 1970, la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los EE. UU) realizó una investigación sobre el uso de plantas para la remediación de la contaminación del aire en los transbordadores espaciales.

En el informe se tomaron en cuenta los diversos contaminantes presentes en el aire, las características de las plantas y la facilidad para conseguirlas. (Center for AeroSpace information , 2007)

Los resultados de este estudio mostraron por ejemplo, que las plantas de follaje eliminaron casi el 87% de los contaminantes del aire de las cámaras selladas para este ensayo dentro de las 24 h de observación. (Wolverton et.al.,1984,1989; Cruz et al., 2014)

En general las plantas absorben los contaminantes gaseosos a través de los estomas de la hoja; algunos COV son reconocidos como xenobioticos a través del metabolismo de los xenobioticos, que involucran a la oxidoreductasa o hidrolasas, la bioconjugacion con azucares, aminoácidos, ácidos orgánicos o péptidos y luego se eliminan del citoplasma para su depósito en vacuolas. (Edwards et al., 2011)

Entre los contaminantes biodepurados por el follaje de las plantas se encuentra material particulado, dióxido de carbono, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono y compuestos orgánicos volátiles (COV) como el benceno, xileno, amoníaco, tricloroetileno y formaldehído. (Panyametheekul, Rattanapun, Morris , & Ongwandee, 2019) (Ciencia, 2015)

Algunas de las especies más destacadas en la depuración de contaminantes atmosféricos de espacios interiores son:

### 5.1 *Epipremnum aureum*



Imágenes recuperadas de <https://hortology.co.uk/products/epipremnum-aureum-golden-pothos-moss-pole>

Es una especie de la familia *Araceae* nativa del sudeste asiático, que puede alcanzar 20 m de altura, con tallos hasta de 4 cm de diámetro. Trepa mediante raíces aéreas que se enganchan a las ramas de los árboles.

Las hojas son perennes, alternas y acorazonadas enteras en las plantas jóvenes, pero irregularmente pinnadas en las maduras y hasta de 1m de largo por 45 cm de ancho.

Es una planta popular en el uso decorativo de ambientes interiores, con numerosos cultivares seleccionados por tener hojas variadas de color amarillo, blanco o verde claro.

Como planta interior puede alcanzar varios metros de altura si se le da el soporte adecuado; los mejores resultados se consiguen proporcionándole luz media indirecta, tolerando luminosidad intensa pero por periodos no tan largos, vegeta bien con una temperatura entre 17 a 30 °C, requiriendo riego solo cuando la tierra se note seca al tacto.

Esta especie tiene cualidades depurativas de contaminantes atmosféricos como el formaldehído, xileno y benceno. (Ciencia, 2015) (Aydogan & Montoya, 2011)

## 5.2 *Spathiphyllum* sp.



Imágenes recuperadas de: <https://hortology.co.uk/products/spathiphyllum-bellini-peace-lily-house-plants>

Conocido bajo los nombres comunes de cuna de moisés, espatifilo, flor de la paz y vela de viento, pertenece al género de plantas con flores perteneciente a la familia *Araceae*.

Es originario de México, América tropical, malacia y el oeste del Pacífico. Son plantas perennes herbáceas con hojas grandes de 12-65cm de largo por 4 cm de ancho aproximadamente.

Las flores se producen en una espádice, rodeado por una espata de 10.30 cm de largo, de color blanco amarillo o verdoso.

Son plantas longevas, habitualmente se encuentran alrededor de arroyos y ríos, con una raíz corta. Las hojas crecen directamente desde la raíz, tienen forma ovalada a veces afilando la punta como la punta de una lanza.

Requiere buena iluminación pero durante los meses de verano es mejor mantenerla alejada de la luz solar directa. (Schott in H.W.Schott. & Endlicher, 2019)

En el estudio realizado por la NASA *Spathiphyllum spp*, extrajo 16mg de formaldehído, 27 mg de tricloroetileno y 41mg de benceno de cámaras selladas después de una exposición de 24 horas al producto químico correspondiente. (Wolverton, Johnson, & Bounds, 1989)

### 5.3 *Sansevieria trifasciata*



Imágenes recuperadas de: <https://greenleafnurseries.co.nz/product/sansevieria-trifasciata-house-plant/>

Es una especie de sansevieria, originaria del oeste de África tropical hasta Nigeria y al este de República Democrática del Congo.

Es un género de plantas herbáceas, perennes, xerofíticas, rizomatosas o estoloníferas, acaules o con un tallo muy corto, apreciadas como ornamentales de follaje debido a la variación, moteado y amplia variación en la forma de sus hojas, aplanadas, semi-cilíndricas, cilíndricas, comprimidas lateralmente de lineares a lanceoladas u ovadas, erectas, rígidas o flexibles. (Pérez León, Chavarría Pérez, Araya Quesada, & Gómez Alpízar, 2013)

Son plantas caulecentes, sus hojas son erectas, lanceoladas hasta 140 cm de largo y de 4-10cm de ancho, agudas, rígidas, verde oscuro con líneas transversales verde mas pálido, los márgenes enteros, verdes o a veces amarillos.

La inflorescencia es racimosa, ocasionalmente ramificada de 50-80cm de largo, flores en fascículos solitarios o agrupados, blanco verdosas. El fruto es una baya anaranjada con una semilla.

Es una especie muy resistente a condiciones ambientales desfavorables, puede tolerar cercanas a los 40°C de máxima y de -5°C de mínima.

Esta planta es purificadora de ambientes contaminados con benceno, xileno, tolueno, tricloro etileno y formaldehído. (Wolverton, Johnson, & Bounds, 1989) (Ciencia, 2015)

#### **5.4 *Chamaedorea seifrizii***



Imagen recuperada de: <https://naturescolours.com.au/product/bamboo-palm-chamaedorea-seifrizii-12-5cm-125mm/>

Conocida comúnmente como palmera bambú o palmera china, es una especie de palmera originaria de Asia.

Con tallos a manera de cañas de bambú que pueden llegar a medir hasta de 3 metros de alto y 2 centímetros de espesor. Inflorescencias ramificadas de 50 a 60cm de largo, color anaranjado rojizo y pequeños frutos negros en su madurez.

Se encuentra en los bosques secos, laderas por debajo de los 1000 metros de altura. Tiene la capacidad de eliminar del aire formaldehído, xileno y amoníaco. (Ciencia, 2015)



### 5.5 *Dracaena deremensis*



Imágenes recuperadas de: <https://plants.ces.ncsu.edu/plants/dracaena-deremensis/>

Se encontró inicialmente en las islas Canarias y de allí se trajo a los trópicos americanos, donde presenta un crecimiento exuberante.

Es una planta ornamental conocida por su apariencia y facilidad para crecer en espacios interiores. Dentro de las especies *D. deremensis* existen variedades como la “Janet Craig”, la cual se caracteriza por sus hojas gruesas, oscuras y brillantes, puede crecer hasta 305 cm. (Blanco, Valverde, & Gómez, 2004)

Es una planta de crecimiento erecto que desarrolla un troco grueso y redondeado, las hojas se disponen en rosetas y crecen superpuestas sobre el troco, son largadas, lanceoladas terminadas en punta.

Esta especie tiene la capacidad de biodepurar considerablemente el aire de formaldehído. (Wolverton, Johnson, & Bounds, 1989)

## **6. ESPECIES SILVICOLAS CON POTENCIAL MITIGANTE DE OLORES OFENSIVOS**

### 6.1 *Cananga odorata*



Imágenes recuperadas de: [http://treeworldwholesale.com/es/arboles/682-cananga-odorata.html#lightbox\[group\]/0/](http://treeworldwholesale.com/es/arboles/682-cananga-odorata.html#lightbox[group]/0/)

Este árbol se cultiva en Asia tropical y algunas islas del océano Índico, principalmente en las islas de Comoro, Nossi-bé y Madagascar.

Conocido como el árbol Ylang ylang, es un árbol de tamaño moderado a grande, con hojas oblongo – ovaladas (6 – 8 pulgadas) de ramas colgantes frágiles, que le da una apariencia atractiva pero desordenada. Su corteza es lisa de color gris, alcanzando la madurez a los 4 – 5 años, teniendo grandes grupos de flores de hasta una docena de color verdoso amarillento; sus frutos se asemejan a las aceitunas y nacen en racimos.

Crece bien en suelos húmedos, se poda periódicamente y no tiene problemas de plagas o enfermedades.

Fue introducido a Colombia en la década de los treinta y mostro una gran adaptación a las condiciones climáticas y geobotánicas del país.

El aceite esencial de ylang-ylang se usa como aromatizante en alimentos y perfumería, en la preparación de cremas, lociones y perfumes finos de alto valor comercial. (Leyva, Ruiz , Martínez, & Stashenko, 2007)

## 6.2 *Cestrum nocturnum*



Imágenes recuperadas de: <https://weeds.brisbane.qld.gov.au/weeds/night-scented-jasmine>

Es un arbusto que alcanza un tamaño de hasta 5m de alto, con ramitas menudamente pubescentes, sus hojas ovaladas o elípticas de 6-11 cm de largo, ápice acuminado. Las inflorescencias se presentan en formas de racimos cortos con muchas flores, axilares o terminales, frecuentemente en las ramas frondosas a menudo amontonadas o formando panículas, el raquis a veces puberulento, alargándose en el fruto, pedicelos subobsoletos, flores nocturnas y conspicuamente fragantes; cáliz cupulifome, de 2-3 mm de largo, corola amarilla o verdosa en forma de tubo delgado de 14-19 mm de largo, el fruto es una baya globosa blanca de hasta 7 – 10 mm de largo, semillas de 3-6 mm de largo.

Es un arbusto cultivado en jardines por sus flores aromáticas, pertenece a la familia de las Solanáceas. El extracto de la planta se ha utilizado como antiespasmódico, contra erupciones cutáneas y especialmente, en la epilepsia, (Buznego, y otros, 1997) lo que le confiere cualidades tranquilizantes convirtiéndose en una potencial especie aromática en las explotaciones pecuarias como estrategia de mitigación de olores ofensivos.

En un estudio realizado por Buznego, y otros, se comprobó su acción tranquilizante, aumento de la pasividad y disminución de la respuesta al dolor en animales.

## **7. ESPECIES HABITUALMENTE EXPUESTAS A GASES VOLCANICOS CON POTENCIAL BIODEPURANTE DE COMPUESTOS AZUFRADOS**



### 7.1 *Cibotium menziesii*



Imágenes recuperadas de: [http://memory.hawaii.edu/object/Cibotium\\_menziesii\\_fullview.html](http://memory.hawaii.edu/object/Cibotium_menziesii_fullview.html)

Es una especie de helecho arbóreo que es endémico de las islas de Hawái; puede crecer hasta 11 m de alto, pero generalmente tiene una altura de 2 – 7 m. con un diámetro de 1 m.

El tronco está hecho de fibras rígidas y duras que rodean una medula almidonada en el centro. Las frondas verdes tienen nervios centrales amarillos y son más pálidos en la parte inferior.

Esta especie se reproduce por medio de esporas que se liberan desde el extremo de las frondas.

Es endémico de las porciones de barlovento de las principales islas hawaianas. Se encuentra en los bosques lluviosos a elevaciones de 305 a 1830 metros. Pueden crecer en el

suelo o en arboles como una epifita. A pesar de su origen, es muy adaptable y puede soportar inviernos largos y fríos, incluso sin frondas.

El tronco es utilizado como alimento por los cerdos salvajes.

Por ser una especie habitualmente expuesta a contaminación gaseosa volcánica, como lo son el dióxido de azufre, el sulfuro de hidrógeno, el dióxido de carbono, el cloruro de hidrógeno, el fluoruro de hidrógeno y material particulado, se convierte en una especie candidata para biodepurar el aire de los agroecosistemas contaminados por la actividad agropecuaria.

## **DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

Esta revisión da cuenta de los ensayos realizados a nivel global encaminados a disminuir los niveles de contaminantes de los compuestos orgánicos volátiles (COV) comunes en espacios cerrados como oficinas, edificios, cabinas de aeronaves etc; sin embargo los trabajos de investigación acerca de la fitorremediación atmosférica en ambientes exteriores y especialmente de los impactos atmosféricos emitidos por las explotaciones pecuarias son nulos.

Los primeros estudios realizados para determinar la capacidad fitorremediadora del aire en espacios confinados y de pequeña área, fueron desarrollados por la Administración Nacional de la Aeronáutica Espacial- NASA en la década de los 80 obteniendo resultados positivos, sin embargo al probar su capacidad biodepurante del aire en edificios los resultados no fueron contundentes, razón por la cual se puso en tela de juicio la efectividad de las plantas para este proceso.

En otro estudio realizado por Creighton y colaboradores (2015), se desarrolló un modelo matemático para determinar la densidad de plantas a utilizar en una determinada área, encontrando que la tasa de fitorremediación en salas con espacios de  $60\text{m}^3$  y en otras más pequeñas de  $1\text{m}^3$  en condiciones idénticas, fue de 1:20; en consecuencia para obtener una reducción del 67% de COVs, en una

casa de 300m<sup>3</sup> se requeriría de 360 a 750 plantas dependiendo la especie utilizada (*Gardenia jasminoide* - *Rosmarinus officinalis* respectivamente)

Así mismo, después de evaluar la eliminación de formaldehído por las partes aéreas de las plantas, frente a la zona de la raíz, la relación fue de 1:1, durante el día, pero disminuyó a 1:11 en horas de la noche cuando los estomas se cerraron, situación que debe tenerse en cuenta al formular el conjunto de especies a utilizar para este fin, pues el tipo de fotosíntesis realizada (C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> o CAM), incide directamente en el proceso de fijación e intercambio gaseoso entre ellas y el ambiente.

Teiri y Colaboradores (2018) encontraron que la capacidad máxima de formaldehído fue de 14,6mg/m<sup>3</sup>; en concentraciones superiores la eficiencia de eliminación se redujo notablemente, demostrando que las plantas llegan a un estado de saturación que detiene el proceso de fijación gaseosa, por ende es necesario determinar el tipo de contaminante, la intensidad de contaminante emitido, las plantas fitorremediadoras específicas del contaminante, el área a descontaminar y en consecuencia la densidad de plantas a utilizar para obtener un proceso funcional.

Otros estudios realizados por Xianaying y colaboradores, dan cuenta que las asociaciones de plantas con microorganismos (Bacterias, hongos y levaduras), conforman un microecosistema denominado filosfera, que tiene la capacidad de degradar y transformar compuestos contaminantes como material particulado, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y CH<sub>2</sub>O a compuestos orgánicos simples, aminoácidos y/o proteínas, para su posterior aprovechamiento.

Desde la perspectiva abordada de esta revisión, los métodos de medición y por supuesto de control de las emisiones de contaminantes especialmente de tipo atmosférico, producto de las actividades agropecuarias en nuestro país y en el

mundo son incipientes, razón por la cual toma importancia la búsqueda de estrategias ambientales que permitan contrarrestar los impactos negativos generados, en el afán de producir alimentos que satisfagan las necesidades de la creciente población humana de manera sostenible.

Problemáticas como el calentamiento global producto de la alta producción antropogénica de gases efecto invernadero, muchos de ellos producidos por las explotaciones ganaderas, torna imprescindible la investigación en este campo del conocimiento, partiendo de la premisa de que la naturaleza ha encontrado a través de millones de años, estrategias para adaptarse, mitigar y/o aprovechar elementos que en grandes cantidades pudiesen ser tóxicos para los componentes de sus ecosistemas.

Si bien los olores ofensivos no son mortales, si pueden causar problemáticas sociales que perjudican la buena convivencia entre comunidades y el óptimo desarrollo de sus poblaciones; el uso de especies con cualidades fitorremediadoras y/o mitigadoras de olores ofensivos, pueden llegar a convertirse en estrategias de empleo en gestión ambiental como los son los Planes de Reducción del Impacto de Olores Ofensivos (PRIO), por las explotaciones pecuarias.

Las especies caracterizadas en esta investigación, son en su mayoría plantas que la NASA, ha establecido como especies ornamentales con capacidades fitorremediadoras de aire en ambientes cerrados, aún en el campo de la fitorremediación atmosférica exterior no se han realizado estudios, lo que confiere a este campo del conocimiento potencial de exploración en otras plantas tropicales.

Compuestos causantes de los olores ofensivos, como lo son los mercaptanos o el mismo sulfuro de hidrógeno, pueden ser fitorremediados por plantas que en la naturaleza estén expuestas habitualmente a estos compuestos contaminantes; un

ejemplo de estas son las especies de hábitats próximos a las zonas volcánicas en donde se emiten gases tóxicos, compuestos en su gran mayoría por azufre. Investigaciones en el mecanismo de adaptación y asimilación de estos contaminantes gaseosos por las especies vegetativas aledañas, pudiesen generar soluciones a los impactos producidos por las explotaciones pecuarias donde se emiten este tipo de compuestos por efecto de la actividad ganadera.

## CONCLUSIÓN

El desarrollo de las actividades agropecuarias día tras día, requiere de mayor intensificación y eficiencia en el uso de los recursos naturales para generar las soluciones alimentarias que la creciente población demanda, pero sobre todo para permitir la renovación de los mismos en el tiempo y proveer sostenibilidad ambiental, social y económica.

La fitorremediación se presenta como una posible estrategia mitigante y/o correctiva de la emisión de contaminantes al suelo, a los cuerpos de agua y a la atmosfera, en donde para este último recurso no se ha realizado la investigación que amerita los niveles de contaminación por gases efecto invernadero y olores ofensivos que la industria agropecuaria produce.

Por esta razón se recomienda ahondar en la investigación de los procesos realizados por las plantas y sus asociaciones con microorganismos, que pudiesen permitir la degradación de compuestos contaminantes atmosféricos originados por las actividades pecuarias.

## REFERENCIAS

- Alvarez Bello, I., & Reinaldo Escobar, I. (2015). Efecto del Pectimorf® en el índice estomático de plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Cultivos Tropicales*, 82-87.
- Andrade, J., Barrera, E., Reyes, C., Ricalde, F., Vargas, G., & Cervera, J. (2007). El metabolismo ácido de las crasuláceas: diversidad, fisiología ambiental y productividad. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 37-50.
- Ardila, A., & Vergara, W. (2012). El sector pecuario frente al cambio climático: una realidad incómoda. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 107-120.
- Arias, S., Betancur, F., Gomez, G., Salazar, J., & Hernández, M. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico (Colombia)*, 12-22.
- Aydogan, A., & Montoya, L. (2011). Formaldehyde removal by common indoor plant species and various growing media. *Atmospheric Environment*, 2675-2682.
- Azcón, J., Fleck, I., Aranda, X., & Gómez, N. (2008). Fotosíntesis, factores ambientales y cambio climático. En J. Azcón, & M. Talón, *Fundamentos de Fisiología Vegetal* (págs. 241-263). Barcelona - España: Mc Graw Hill.
- Azcon Bieto, J., & Talón, M. (2013). *Fundamentos de fisiología vegetal*. Madrid: McGraw Hill.
- Bernal, A. (2014). Fitorremediación en la recuperación de suelos: una visión general. *Revista de investigación agraria y ambiental*, 245-256.
- Blanco, M., Valverde, R., & Gómez, L. (2004). Micropropagación de *Dracaena deremensis*. *Agronomía costarricense*, 7-15.
- Brilli, F., Fares, S., Ghirardo, A., Visser, P., Calatayud, V., Muñoz, A., . . . Menghini, F. (2018). Plants for sustainable Improvement of Indoor Air Quality. *Trends in Plant Science*, 507-512.
- Buznego, M., León, N., Acevedo, M., Llanio, M., Fernández, M., & Pérez, H. (1997). Perfil neurofarmacológico del *Cestrum nocturnum* L. (Galán de la noche). *Rev Cubana Plant Med*.
- Calsamiglia, S. (2012). Congreso Internacional ANEMBE de Medicina Bovina. *Producción de rumiantes, estrategias productivas y emisiones de gases efecto invernadero* (págs. 20-26). Santander - España: ANEMBE Asociación Nacional de Especialistas en Medicina Bovina de España.
- Canet, R., Ribo, M., Pomares, F., & Albiach, M. (2006). Caracterización y potenciales impactos ambientales de las deyecciones ganaderas. *Conferencia sobre Gestión Integral de deyecciones ganaderas* (págs. 23-38). Barcelona: EXPOAVIGA.

- Carmona, J., Bolivar, D., & Giraldo, L. (2005). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 49-63.
- Center for AeroSpace information , (. (2007). Plants clean air and water for indoor environments. *Spinoff 2007*, 60-61.
- Ciencia, B. (26 de noviembre de 2015). *BBC NEWS / Mundo*. Obtenido de 5 plantas que la NASA recomienda para purificar el aire de tu casa:  
[https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/11/151126\\_plantas\\_aire\\_limpio\\_nasa\\_lp](https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/11/151126_plantas_aire_limpio_nasa_lp)
- Creighton, T., Kwang, J., & Stanley, K. (2015). Phytoremediación of Indoor Air. *HortScience*, 765-768.
- Delgadillo Lopez, A., Gonzalez Ramirez, C., Prieto Garcia , F., Villagomez Ibarra, J., & Acevedo Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 597-612.
- Division of Toxicology and Human Health Sciences. (Octubre de 2014). *Agency for toxic substances and disease registry*. Obtenido de Resumen de salud publica- acido sulfhidrico:  
[https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs114.pdf](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs114.pdf)
- Faverin, C., Gratton, R., & Machado, C. (2014). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas de producción de carne vacuna de base pastoril . *Revista Argentina de Producción Animal*, 33-54.
- Geydan , T., & Melgarejo, L. (2005). Metabolismo Acido de las Crasulaceas. *Acta Biológica Colombiana*, 3-15.
- Herrera, J., Rojas, J., & Bolaños , A. (2013). Diagnóstico preliminar de los niveles de emisión de amoníaco y sulfuro de hidrogeno en distintas modalidades de producción en granjas avícolas en Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales Tropical Journal of environmental Sciences*, 15-26.
- Herrero , M., & Gil, S. (2008). Consideraciones ambientales de la intensificación en producción animal. *Ecología Austral*, 273-289.
- INCONTEC. (28 de 08 de 2013). Norma Técnica Colombiana NTC 6012-1. *Efectos y evaluación de los olores. Evaluación sicométrica de las molestias por olores. Cuestionarios*. Bogota D.C, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (INCONTEC).
- INTAGRI. (05 de 07 de 2019). *INTAGRI*. Obtenido de La absorcion de nutrientes en la fertilización foliar: <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/La-absorcion-de-nutrientes-a-traves-de-la-fertilizacion-foliar>
- Lara, M., Drincovich, M., & Andreo, C. (2000). Transiciones metabólicas en la fijación fotosintética del carbono en plantas del género *Portulaca*. *Centro de Estudios Fotosintéticos y Bioquimicos, CONICET*, 43-55.



- Leyva, M., Ruiz, C., Martínez, J., & Stashenko, E. (2007). Variación anual de la composición química del aceite esencial de flores de Ylang-Ylang (Cananga). *Scientia Et Technica*, 151-153.
- Mazzucchelli, F., & Sánchez, A. (2018). Impacto ambiental de las explotaciones vacuno lechero. *Axon comunicaciones.net*, 42-50.
- Min. Ambiente y Desarrollo Sostenible. (24 de 03 de 2010). Resolución 610 de 2010. Bogotá D.C, Colombia.
- Min. de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (16 de 12 de 2014). Resolución 2087 de 2014. *Por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo, Control y Vigilancia de olores ofensivos*. Bogota D.C, Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Min. de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Reglamento de Olores Ofensivos. *Normas de evaluación y emisión de olores ofensivos*. Bogota D.C, Colombia: Dirección de Asuntos Ambientales Sectorial y Urbana- MADS.
- Min. Medio Ambiente y Desarrollo sostenible, & FENAVI. (2014). Guía ambiental para el subsector Avícola. Bogota D.C, Colombia: Fenavi- Fonav; MIN. AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE.
- Morazán Nuñez, H. (2014). Emisión de amoníaco (NH<sub>3</sub>) y gases con efecto invernadero (CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O) en cerdos en crecimiento: efecto del nivel de proteína y fibra de la ración. *Memoria presentada por Henris Jobany Morazán Nuñez para optar el grado de Doctor por la Universidad de Lleida*. Lleida, España: Tesis Doctoral Henris Morazán Nuñez.
- Mosquera, L., Riaño, N., Arcila, J., & Ponce, C. (1999). Fotosíntesis, respiración y fotorrespiración en hojas de café Coffea sp. *Cenicafe*, 215-221.
- Murillo Castillo, R., Piedra Marin, G., & León, R. (2013). Absorción de nutrientes a través de la hoja. *Uniciencia*, 232-244.
- Nuñez, G., Rodríguez, K., Granados, A., Anaya, A., Cardenas, J., & Figueroa, U. (2015). Emisiones de metano del gando lechero en explotaciones lechers en la región lagunera. *Agrofaz*, 17-26.
- Panyametheekul, S., Rattanapun, T., Morris, J., & Ongwandee, M. (2019). Foliage houseplant responses to low formaldehyde levels. *Building and Environment*, 67-76.
- Pedraza Ortiz, L. (2015). La biodepuración del aire con plantas purificantes y ornamentales, como alternativa ambiental en el siglo XXI. *Monografía Descriptiva*. Bogota D.C, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Pérez León, G., Chavarría Pérez, L., Araya Quesada, J., & Gómez Alpízar, L. (2013). IDENTIFICACIÓN DEL AGENTE CAUSAL DE LA ANTRACNOSIS DE Sansevieria spp. EN COSTA. *Agronomía Costarricense*, 39-50.

- Pettit, T., Irga, P., & Torpy, F. (2018). Towards practical indoor air phytoremediation: A review. *Chemosphere*, 960-974.
- Ramos Rincon, J., Bermudez, A., & Rojas, T. (2017). Contaminación odorífera: causas, efectos y posibles soluciones a una contaminación invisible. *Revista de investigación Agraria y Ambiental*, 165-179.
- Rodriguez Pinos, J., Lopez Garcia, J., Avelino Peña, L., Huerta Rendon, J., Gonzalez Gonzalez, C., & Patiño Tristan, F. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiercol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *AGROCIENCIA*, 359-370.
- Ruda, E., Mongiello, A., & Acosta, A. (2004). *Contaminación y salud del suelo*. Santa Fe - Argentina: Ediciones UNL.
- Saynes, V., Etchevers, J., Paz, F., & Alvarado, L. (2016). Emisiones de gases efecto invernadero en sistemas agrícolas en México. *Terra Latinoamericana*, 84-96.
- Schott in H.W.Schott., & Endlicher, S. (8 de 09 de 2019). *Spathiphyllum lanceifolium*. Obtenido de [https://www.ecured.cu/Spathiphyllum\\_lanceifolium](https://www.ecured.cu/Spathiphyllum_lanceifolium)
- Tabler, G. (2006). Malos olores: preocupación para los productores. *Avian Advice*, 8(1).
- Teiri, H., Pourzamani, H., & Hajizadeh, Y. (2018). Phytoremediation of VOCs from indoor air by ornamental potted plants: A pilot study using a palm species under controlled environment. *Chemosphere*, 375-381.
- Toral, M., Manriquez, A., Navarro Cerillo, R., Tersí, D., & Naulin, P. (2010). Características de los estomas, densidad e índice estomático en secuoya (*Sequoia sempervirens*) y su variación en diferentes plantaciones de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 157-164.
- Velasco, J., Alvarado, H., Hernández, A., Gómez, F., Narciso, C., & Misselbrook, T. (2016). Buenas prácticas de manejo y emisiones de amoníaco en explotaciones avícolas. *Agroproductividad*, 38-44.
- Wolverton, B., Johnson, A., & Bounds, K. (1989). *Interior Landscape Plants for Indoor air pollution abatement*. Mississippi: John C. Stennis Space Center - NASA Science and Technology Laboratory.
- Xiangying, W., Shiheng, L., Ying, Y., Zonghua, W., Hong, L., Dongming, P., & Jianjun, C. (28 de 07 de 2017). *Frontiers in Plant Science*. Obtenido de Phylloremediation of Air Pollutants: Exploiting the Potential of Plant Leaves and Leaf-Associated Microbes: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01318>